

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

**К. С. Сундучков, І. В. Кононова**

# **БЕЗПРОВОДОВІ ІНФОРМАЦІЙНО- КОМУНІКАЦІЙНІ СИСТЕМИ СИСТЕМИ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ**

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра  
за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»*

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2019

Рецензент *Кузавков В.В.*, д-р техн. наук, доцент начальник кафедри побудови телекомунікаційних систем, Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут  
*Явіся В.С.*, канд. техн. наук, доцент, В.О. завідувача кафедри телекомунікацій ІТС, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

Відповідальний редактор *Правило В.В.*, канд. техн. наук, доцент

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 3 від 28.11.2019 р.)  
за поданням Вченої ради інституту телекомунікаційних систем (протокол № 10 від 25.11.2019 р.)*

Електронне мережне навчальне видання  
*Сундучков Костянтин Станіславович*, д-р техн. наук, проф.  
*Кононова Ірина Віталіївна*, канд. техн. наук

# БЕЗПРОВОДОВІ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ СИСТЕМИ СИСТЕМИ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Безпроводові інформаційно-комунікаційні системи: Системи мобільного зв'язку. Лабораторний практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / К. С. Сундучков, І. В. Кононова; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 5,827 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 59 с.

Лабораторний практикум містить дев'ять лабораторних робіт. Лабораторні роботи № 1–4 направлені на дослідження характеристик розповсюдження радіохвиль в радіоканалі системи мобільного зв'язку; залежності коефіцієнта підсилення антени з параболічними дзеркалами та визначення параметрів сигналів OFDM. Лабораторна робота № 5 присвячена дослідженню тривалості часового захисного інтервалу в OFDM-символі при багатопроменивості. Лабораторна робота № 7–8 направлені на дослідження необхідної кількості піднесучих, які використовуються у паралельному режимі для забезпечення заданої бітової швидкості та визначення потужності сигналу, що надходить з космічного апарату від одного абонента. Лабораторна робота № 9 присвячена визначенню сумарної еквівалентної шумової температури на вході земної станції і добротності земної станції систем супутникового зв'язку.

Навчальний посібник призначено для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за спеціальністю: 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

© К. С. Сундучков, І. В. Кононова, 2019  
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019

## ЗМІСТ

Вступ .....	4
Вимоги до оформлення .....	5
Лабораторна робота №1. «Дослідження характеристик поширення радіохвиль у мобільному зв'язку. Розрахунок необхідної потужності передавача» .....	6
Лабораторна робота №2. «Дослідження залежності коефіцієнта посилення антен з параболічними дзеркалами» .....	12
Лабораторна робота №3. «Дослідження математичної моделі розрахунку покриття траси автобана однієї соті ділянки безпроводового доступу в міліметровому діапазоні» .....	16
Лабораторна робота №4. «Визначення параметрів сигналу OFDM» .....	21
Лабораторна робота №5. «Дослідження необхідної тривалості часового захисного інтервалу в OFDM-символі при багатопроменевості для боротьби з міжсимвольними спотвореннями» .....	30
Лабораторна робота №6. «Дослідження необхідної кількості піднесучих, що працюють в паралельному режимі для забезпечення заданої бітової швидкості» .....	38
Лабораторна робота №7. «Визначення потужності сигналу, що прийшов з космічного апарату (КА) від одного абонента в площині стикування антени з лінійним трактом земної станції (ЗС) системи супутникового зв'язку» .....	42
Лабораторна робота №8. «Дослідження сумарної еквівалентної шумової температури на вході ЗС і добротності ЗС систем супутникового зв'язку (ЗС ССЗ) в площині стикування антени з лінійним трактом ЗС ССЗ» .....	51
Лабораторна робота №9. «Визначення величини еквівалентної ізотропної випромінюваної потужності сигналу транспондером космічного апарату при передачі однієї телевізійної програми» .....	56

## ВСТУП

Характерна риса сучасного світу – широке використання рухомого зв'язку. В даний час в більшості країн кількість абонентів мобільного зв'язку починає перевершувати кількість абонентів стаціонарної мережі. Надійність стільникового зв'язку і її якість в даний час залежить від місцевості, погодних і радіоелектромагнітних умов. Абонент не завжди може бути впевнений, що зв'язок буде надана в будь-якому місці і в будь-який час.

Послуги мультимедіа, що надаються мережами мобільного зв'язку доповнені доступом в Інтернет при цьому однією з основною метою є досягнення якості зображень не гірше, ніж надається в xDSL. Тому дослідження в цих напрямках складають основу сучасної науки і практики розвитку мобільних систем.

Отже, метою лабораторного практикума є формування у студентів здатності проведення аналізу та проектування сучасних систем мобільного зв'язку і їх основних складових частин, експериментального визначення та оцінки параметрів елементів систем мобільного зв'язку, застосовування програмного забезпечення для розрахунків основних параметрів мобільних систем зв'язку, розробки математичних моделей систем мобільного зв'язку; синтезувати структурні схеми безпроводових інформаційно-комунікаційних систем за технічним завданням.

Кожна лабораторна робота містить набір засобів, розроблених з метою закріпити суттєві поняття. Цей набір складається з двох частин: питання і вправи за складністю вони розраховані на студентів, які прослухали курс лекцій, а також призначені для того, щоб перевірити первинне знання матеріалу, представленого в лекціях.

Представлений матеріал служить навчальним посібником для виконання лабораторних робіт з дисципліни «Системи мобільного зв'язку».

## ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ

1. На першому аркуші повинні бути вказані:

ВНЗ, група, П.І.Б., дата, найменування теми роботи, номер варіанта.

2. Навести всі вихідні дані для вашого варіанту .

3. З кожного питання з розділу «Завдання на виконання лабораторної роботи» привести зміст питання, формули за якими буде проведений розрахунок, значення параметрів у формулах для вашого варіанту, відповідь, розмірність та за необхідністю побудувати графіки.

4. Всі розрахунки виконуються на персональному комп'ютері.

5. Звіт представити у вигляді роздрукованому на форматі А4 і в електронному вигляді, що дозволяє змінювати вихідні значення і ввести розрахунок заново.

ЛАБОРАТОРНА РАБОТА №1

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ У  
МОБІЛЬНОМУ ЗВ'ЯЗКУ. РОЗРАХУНОК НЕОБХІДНОЇ ПОТУЖНОСТІ  
ПЕРЕДАВАЧА

1. ВСТУПНА ЧАСТИНА

1. Мета роботи:

1) Ознайомитися з принципами поширення радіохвиль в каналі зв'язку, системами прямої та непрямою видимості, впливом атмосферних перешкод на поширення електромагнітних хвиль, послугами мереж мобільного зв'язку та можливої дальністю зв'язку;

2) Навчитися обчислювати втрати при поширенні сигналу на комбінованій трасі, а також необхідну вихідну потужність передавача для забезпечення заданої якості прийому сигналу;

3) Дослідити характеристики поширення радіохвиль в радіоканалі системи мобільного зв'язку;

4) Побудувати графік залежності вихідної потужності передавача при віддаленні приймача на задану відстань.

2. ВИХІДНІ ДАНІ

Ймовірність бітової помилки,  $BER = 10^{-6}$ ;

Відношення сигнал / шум,  $SNR = 20\text{дБ}$ ;

Шумова температура приймача мобільного терміналу  $T_{\text{пмт}} = 100\text{ К}$ ;

Завмирання на радіолінії FM = 10 дБ;

Коефіцієнт посилення антен передавача  $G_T = 20\text{ дБ}$ ;

Коефіцієнт посилення антен приймача  $G_R = 1\text{ дБ}$ ;

Втрати за рахунок відгалуження  $LB = -0,5\text{ дБ}$ ;

Втрати в антенному фідері  $LF = -0,5\text{ дБ}$ .

## ЗАВДАННЯ НА ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

Варіант № п/п	d, м	d <sub>0</sub> , м	f, ГГц	$\Delta f$ , МГц	Варіант № п/п	d, м	d <sub>0</sub> , м	f, ГГц	$\Delta f$ , МГц
1.	500	500	65	100	24.	500	500	65	100
2.	1000	1000	40	50	25.	1000	750	40	50
3.	1500	500	20	10	26.	1500	500	20	10
4.	2000	1500	5	0,5	27.	2000	1500	5	0,5
5.	1000	1000	65	200	28.	1000	1000	65	200
6.	750	750	40	100	29.	750	750	40	100
7.	1500	1250	20	20	30.	1500	1250	20	20
8.	2000	900	5	1	31.	2000	900	5	1
9.	750	750	65	100	32.	750	750	65	100
10.	1000	750	40	50	33.	1000	1000	40	50
11.	1500	1250	20	10	34.	1500	1250	20	10
12.	2000	750	5	0,5	35.	2000	750	5	0,5
13.	500	500	65	200	36.	500	500	65	200
14.	1000	1000	40	100	37.	1000	1000	40	100
15.	1500	1250	20	20	38.	1500	1250	20	20
16.	2000	1000	5	1	39.	2000	1000	5	1
17.	500	500	65	100	40.	1000	1000	65	100
18.	1000	1000	40	50	41.	500	500	40	50
19.	1500	500	20	10	42.	1500	500	20	10
20.	2000	250	5	0,5	43.	2000	250	5	0,5
21.	750	500	65	200	44.	500	500	65	200
22.	1000	750	40	100	45.	1000	750	40	100
23.	1500	250	20	20					

Алгоритм виконання роботи.

### 1. Розрахунок втрат при поширенні сигналу

Знайти втрати при поширенні сигналу  $L_{TOT}$  для комбінованої траси LOS і NLOS за даними з таблиці варіантів, де:  $d$  – відстань (рознесення) між передавальною і приймальною антенами;  $d_0$  – довжина відрізка траси до першої перешкоди (ділянка поширення у вільному просторі);  $f$  – частота несучого коливання;  $\Delta f$  – смуга пропускання приймача.

### 2. Розрахунок мінімально допустимої прийнятої потужності сигналу

Визначити мінімально допустиму прийняту потужність несучої  $P_{Rmin}$ , дБ, для заданого значення показника якості прийому (ймовірності бітової помилки)  $BER=10^{-6}$ . Для всіх варіантів прийняти відношення сигнал / шум  $SNR= 20$  дБ; шумова температура приймача мобільного терміналу  $T_u= 100$  К.

Вхідні каскади приймача генерують шуми, потужність яких може бути обчислена за такою формулою:

$$P_u = k \cdot T_u \cdot \Delta f,$$

де  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  – постійна Больцмана;  $T_u$  – еквівалентна шумова температура;  $\Delta f$  – смуга робочих частот приймача, яку обмежують за допомогою селективних елементів до смуги частот в якій зосереджений спектр сигналу. **Постійна Больцмана** ( $k$  або  $k_B$ ) – одна з основних фізичних постійних, яка визначає зв'язок між температурою і енергією, що дорівнює відношенню газової постійної  $R$  до числа Авогадро  $N_A$  (числу частинок в одному молі речовини).  $k = 1.3808 \dots \cdot 10^{-23}$  Дж/К.

### 3. Розрахунок необхідної вихідної потужності передавача

Визначити коефіцієнт посилення системи  $G_s$  і необхідну вихідну потужність передавача  $P_m$  для забезпечення необхідного значення показника якості прийому на заданій відстані. Запас на завмирання на радіолінії  $F_M$  прийняти рівним 10 дБ, врахувати ослаблення сигналу в атмосфері для обраного діапазону частот (використовуючи рис. 3а); коефіцієнти посилення антен передавача і приймача  $G_T= 20$  дБ,  $G_R = 1$  дБ; втрати за рахунок відгалуження  $L_B = - 0,5$  дБ; втрати в



антенном фідері  $L_F = -0,5$  дБ (потужність сигналу передавача представити в абсолютних одиницях [Вт] або в [мВт], так і у відносних одиницях [дБВт] або в [дБмВт]).

### 3. ПРИКЛАД РОЗВ'ЯЗАННЯ ДЛЯ ВАРІАНТУ №40.

Дано:

$$d = 1000 \text{ м};$$

$$d_0 = 1000 \text{ м};$$

$$f = 65 \text{ ГГц} = 65 \cdot 10^9 \text{ Гц};$$

$$\Delta f = 100 \text{ МГц} = 100 \cdot 10^6 \text{ Гц}.$$

Знайти  $L_{\text{TOT}}$ . Втрати при поширенні для комбінованої траси LOS і NLOS:

$$L_{\text{TOT}}(d) = \left(\frac{\lambda}{4\pi d_0}\right)^2 \cdot \left(\frac{d_0}{d}\right)^n;$$

Нехай показник степеня буде рівним:  $n = 4$ .

$$\text{Довжина хвилі } \lambda = c / f = 3 \cdot 10^8 / 65 \cdot 10^9 = 0.0046 \text{ м}.$$

$$L_{\text{TOT}}(d) = P_R / P_T = (0,0046 / 4\pi \cdot 1000)^2 \cdot (1000 / 1000)^4 = 1.35 \cdot 10^{-13} \text{ раз}.$$

$$L_{\text{TOT}}(d) [\text{дБ}] = P_R - P_T = 10 \lg 1,35 \cdot 10^{-13} = -128,7 \text{ дБ}.$$

Знайти  $P_{\text{Rmin}}$ . Необхідне відношення потужності сигналу до потужності шуму  $\text{SNR} = 20 \text{ дБ} = 100$  раз; шумова температура приймача  $T_u = 100 \text{ К}$ .

$$\text{Потужність шумів приймача: } P_u = k \cdot T_u \cdot \Delta f;$$

$$P_u = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 100 \cdot 100 \cdot 10^6 = 1,38 \cdot 10^{-13} \text{ Вт}.$$

Мінімально допустима потужність сигналу несучої приймається:

$$P_{\text{Rmi}} = P_u \cdot 100 = 1,38 \cdot 10^{-11} \text{ Вт}.$$

$$P_{\text{Rmi}} [\text{дБВт}] = 10 \lg 1,38 \cdot 10^{-11} = -108,6 \text{ дБВт}.$$

Знайти  $G_s$  і  $P_T$ . Коефіцієнт посилення системи розраховується за формулою:

$$G_s = P_T - C_{\min} \geq F_M + |L_P| + |L_F| + |L_B| - G_T - G_R;$$

де  $C_{\min} = P_{\text{Rmin}}$  – потужність несучої.

Запас на завмирання в радіолінії  $F_M = 10$  дБ; коефіцієнти посилення антен передавача і приймача  $G_T = 20$  дБ,  $G_R = 1$  дБ; втрати за рахунок відгалуження  $L_B = -0,5$  дБ; втрати в антенному фідері  $L_F = -0,5$  дБ.

Замість величини втрат при розповсюдженні між ізотропними випромінювачами в межах прямої видимості  $L_P$  беремо  $L_{TOT}(d)$  – величину втрат при розповсюдженні для комбінації трас LOS і NLOS.

$$G_s = P_T - P_{Rmin} \geq 10 + 128.7 + 0.5 + 0.5 - 20 - 1 = 118.7 \text{ дБ.}$$

З урахуванням ослаблення сигналу в атмосфері для діапазону 65 ГГц, що довірнює 10 дБ/км і відстанню між передавачем і приймачем рівним 1 км, отримуємо:

$$G_s = 118.7 + 10 = 128.7 \text{ дБ.}$$

Відповідно необхідна вихідна потужність  $P_T$  для передачі даних в смузі частот 100 МГц з ймовірністю бітової помилки  $BER = 10^{-6}$  на відстань 1000м при ділянці вільного простору 1000м повинна становити:

$$P_T \geq G_s + P_{Rmin} \geq 128.70 + (-108.6) \geq 20,1 \text{ дБВт. } P_T [\text{Вт}] = 10^{20.1/10} = 102,3 \text{ Вт} = 102300 \text{ мВт. } P_T [\text{дБмВт}] = 10 \lg 102300 = 50,1 \text{ дБмВт.}$$

## КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Що таке ЕМВ? Якими параметрами вони характеризуються?
2. Які особливості мобільного прийому радіосигналів? Що таке порогова чутливість приймача?
3. Мікромасштабні і макромасштабні зони. Спосіб усунення «мертвих» мікрозон прийому.
4. Що таке системи прямої і непрямой видимості.
5. Модель для оцінки втрат при поширенні радіохвиль при відсутності прямої видимості.
6. Які основні типи атмосферних перешкод ви знаєте?

## ЛІТЕРАТУРА

1. Семенов Н. А. Техническая электродинамика: Учеб. пособие для вузов. – М.: Связь, 480 с.
2. Петров Б. М. Электродинамика и распространение радиоволн: Учебник для вузов.- М.: Радио и связь, 2000. – 599 с.
3. В.Г.Гавриленко, В.А.Яшнов. Распространение радиоволн в современных системах мобильной связи. Курс лекций. Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского. 2003 г.
4. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра: Пер. с англ. / Под ред. В.И. Журавлева. - М.: Радио и связь, 2000. - 520 с.
5. AjayR. Mishra. Advanced cellular network planning and optimisation / Wiley, 2007.-543р.
6. Невдяев Л.М. Мобильная связь 3-го поколения. Серия изданий "Связь и бизнес", М. 2000 - 208 с.
7. Семёнов Ю.А. Телекоммуникационные технологии – курс лекций. ГНЦ ИТЭФ. 2004. <http://citforum.ru/nets/semenov/>.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

### ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ КОЕФІЦІЄНТА ПОСИЛЕННЯ АНТЕН З ПАРАБОЛІЧНИМИ ДЗЕРКАЛАМИ

#### 1. ВСТУПНА ЧАСТИНА

Мета роботи:

- Ознайомитися з технологіями створення і розгортання антен для телекомунікаційних пристроїв, застосуванням активних фазованих решіток для супутникового зв'язку.
- Навчитися обчислювати коефіцієнт посилення і діаметр дзеркала параболічних антен.
- Дослідити графік залежності коефіцієнта посилення антени від діапазону робочих частот антени.

#### 2. ЗАВДАННЯ НА ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

2.1. Розрахувати коефіцієнт посилення антени з параболічним дзеркалом  $K_y^A$ , якщо відомо, що коефіцієнт використання поверхні дзеркала антени  $K_{\text{вп}} = 0,6$ , а діаметр дзеркала антени  $D_A$  і робоча частота  $f_c$  наведені в табл. 2.1.

2.2. Знайти діаметр дзеркала параболічної антени з коефіцієнтом посилення, знайденому в п. 2.1.

2.3. Побудувати графік залежності коефіцієнта посилення параболічної антени при збільшенні діапазону робочих частот на 2, 5 та 12 ГГц.

#### 3. ВИХІДНІ ДАНІ

Загальні дані для всіх варіантів:

1. Коефіцієнт використання дзеркала антени  $K_{\text{вп}} = 0,6$ ;

Посилення антени необхідно обчислити в разях і дБ ( $10\lg K_y^A [\text{дБ}]$ )

Таблиця 2.1.

**Таблиця варіантів лабораторної роботи**

№ п/п	$f_c, \text{ГГц}$ $D_A, \text{см}$	2	3	4	10	12	18,5	20	30	37,5	40
1	60	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	90	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
3	120	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
4	240	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40

Алгоритм виконання роботи.

1. Визначити коефіцієнт посилення антени з параболічним дзеркалом.

$$K_y^A = \frac{K_{\text{вп}} \pi^2 D_A^2}{\lambda^2} \quad (2.1)$$

2. Визначити діаметр дзеркала параболічної антени. Діаметр дзеркала антени можна обчислити якщо відомі  $K_y^A$ ,  $K_{\text{вп}}$  і  $\lambda$ . У сантиметровому діапазоні довжин хвиль для великих антен діаметр дзеркала можна знайти за такою наближеною емпіричною формулою:

$$D_A^2 = \sqrt{\frac{10\lg K_y^A \lambda^2}{5}} \quad (2.2)$$

де підставляються  $10\lg K_y^A$  в [дБ],  $\lambda$  в [см], а відповідь виходить в [м].

3. Побудувати графік залежності коефіцієнта посилення антени при збільшенні діапазону робочих частот на 2, 5, 12 ГГц.

#### 4. ПРИКЛАД РОЗВ'ЯЗАННЯ ДЛЯ ВАРІАНТУ 40

Вихідні дані:

- для визначення коефіцієнта посилення антени:

$D_A = 240 \text{ см}$  – діаметр антени;  $K_{\text{вп}} = 0,6$ .

■ Для визначення довжини хвилі:

$$f_c = 40 \text{ ГГц.}$$

Згідно з формулою 2.1 алгоритму визначимо довжину хвилі і коефіцієнт посилення параболічної антени з круглою апертурою:

$$K_y^A(f_c = 40 \text{ ГГц}) = \frac{K_{\text{вп}} \pi^2 D_A^2}{\lambda^2} = \frac{0,6(3,14)^2 240^2}{(0,75)^2} = \frac{0,6 \cdot 9,86 \cdot 57600}{0,5625} = 605773,8 \text{ раз.}$$

Переведемо знайдену величину в дБ:

$$D = 10 \lg K_y^A = 57,8 \text{ дБ.}$$

Визначимо діаметр дзеркала антени згідно формули 2.2 алгоритму:

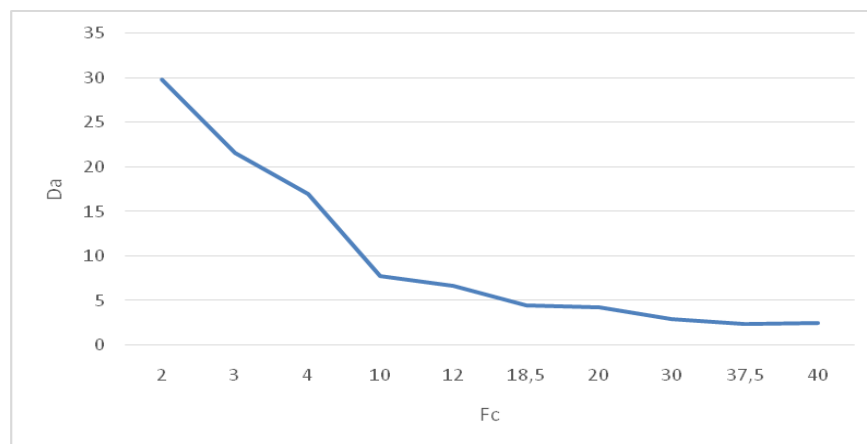
$$D_A = \sqrt{\frac{57,8 \cdot 0,5625}{5}} = 2,55 \text{ (м).}$$

Побудуємо графік залежності діаметру дзеркала антени від використовуваної частоти передачі згідно алгоритму.

Для цього визначимо значення величини діаметра дзеркала антени при різних значеннях частот:

$f_c, \text{ ГГц}$	40	42	45	52
$D_A, \text{ м}$	2,55	2,44	2,28	2

Скориставшись програмою Microsoft Excel побудуємо графік:



Висновок (приклад):

У даній лабораторній роботі ми досліджували залежності коефіцієнта посилення параболічних антен від діапазону робочих частот антени, знайшли коефіцієнт посилення антени з параболічним дзеркалом та необхідний діаметр дзеркала параболічної антени.

### КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Назвіть основні параметри передавальних і приймальних антен.
2. Що таке вібраторна антена, її основні параметри?
3. Як визначити коефіцієнт спрямованої дії рупора?
4. Дайте характеристику дзеркальним антенам.
5. Назвіть основні типи антенних решіток.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Никольский В.В, Никольская Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн.
2. Н.М. Изюмин. Основы радиотехники.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

# ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РОЗРАХУНКУ ПОКРИТТЯ ТРАСИ АВТОБАНА ОДНІЄЇ СОТОЇ ДІЛЯНКИ БЕЗПРОВОДОВОГО ДОСТУПУ В МІЛІМЕТРОВОМУ ДІАПАЗОНІ

## ВСТУПНА ЧАСТИНА

Мета роботи:

Ознакомитись з методом розрахунку покриття однієї сотої ділянки безпроводового доступу.

## 2. ЗАВДАННЯ НА ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

- Визначити величину значень  $R_1$  для всіх  $f$ .
- Побудувати графік залежностей  $R_1(f)$ .
- Розрахувати MN для кожного  $R_1$ .

## 3. ВИХІДНІ ДАНІ

Таблиця 3.1.

Таблиця варіантів лабораторної роботи

$\Delta f_{\text{ш}}$ (МГц) \ $A$ (раз)	10		13		15		17		20	
100	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
200	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
300	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$K^{A1} = K^{A2}$	50	60	50	60	50	60	50	60	50	60

Загальні дані для всіх варіантів:  $f = 20, 30, 40$  [ГГц];



- $P_{\sum_{\text{нас.}}}^{\Phi\Delta} = 130 \cdot 10^{-3} [\text{Вт}];$
- $K^{\text{ПР.}\Phi\Delta} = 10^{-1};$
- $K_{\text{д}500\text{м}} = 0,83 [\text{раз}]$  – коефіцієнт передачі радіоканалу довжиною 500 м;
- $K^{\Delta} = 5 \cdot 10^{-1};$
- $T_{\text{ш.вх.}}^{\sum \text{л.тр.}} = 500 [\text{К}];$
- $k = 1,38 \cdot 10^{-38} [\text{Дж/К}]$  – постійна Больцмана;

Для розрахунку параметрів радіоканалу ділянки безпроводового доступу запропоновано рівняння енергетичного балансу радіоканалу.

Математична модель розрахунку максимально допустимої відстані між БС і МТ.

Коефіцієнт ослаблення сигналу при поширенні:

$$K_{\text{осн}} = \frac{2 \cdot A \cdot k \cdot T_{\text{ш.вх.}}^{\text{МТ}} \cdot \Delta f_{\text{ш}}}{\left( \frac{P_{\sum_{\text{нас.}}}^{\Phi\Delta}}{2} \right) \cdot K^{\text{ПР.}\Phi\Delta} \cdot K^{A1} \cdot K^{\Delta} \cdot K^{A2} \cdot K_{\text{д}}}; \quad K_{\text{осн}} = \frac{1}{L_{\text{осн}}},$$

де  $L_{\text{осн}} = \left( \frac{4 \cdot \pi \cdot R_1}{\lambda} \right)^2$  – основне ослаблення сигналу при поширенні;

$$R_1 = \sqrt{\frac{\left( \frac{P_{\sum_{\text{нас.}}}^{\Phi\Delta}}{2} \right) \cdot K^{\text{ПР.}\Phi\Delta} \cdot K^{A1} \cdot K^{\Delta}}{\left( \frac{2 \cdot A \cdot k \cdot T_{\text{ш.вх.}}^{\text{МТ}} \cdot \Delta f_{\text{ш}}}{K^{A2} \cdot K_{\text{д}}} \right)}} \cdot \frac{c}{4 \cdot \pi \cdot f}.$$

Математичні моделі діаграм спрямованості (ДСП) антен в міліметровому діапазоні.

Варіант поперечної орієнтації з 90-градусної шириною ДСП двухрупорної антени БС, що практично збільшує в 2 рази покриття траси однієї БС. Ось траси автобана, що покриваються однією двухрупорною антеною, позначено MN (рис. 3.1).

обрати величину покриття траси автобана однієї БС: якщо  $\Theta = 22,5^\circ$ , тоді

$$tg\Theta = 0.414 = B_1C_1/OC_1; B_1D_1 = 2 \cdot 0.287 \cdot R_1 = 222.4 [\text{M}]$$

$$R_1 = 387,8 \text{ [M]}. MN \approx 0.9 \cdot 2 \cdot B_1 D_1 = 2 \cdot 222.4 = 400.3 \text{ [M]}$$

де  $MN = f(\Theta, A, R, \dots)$ .

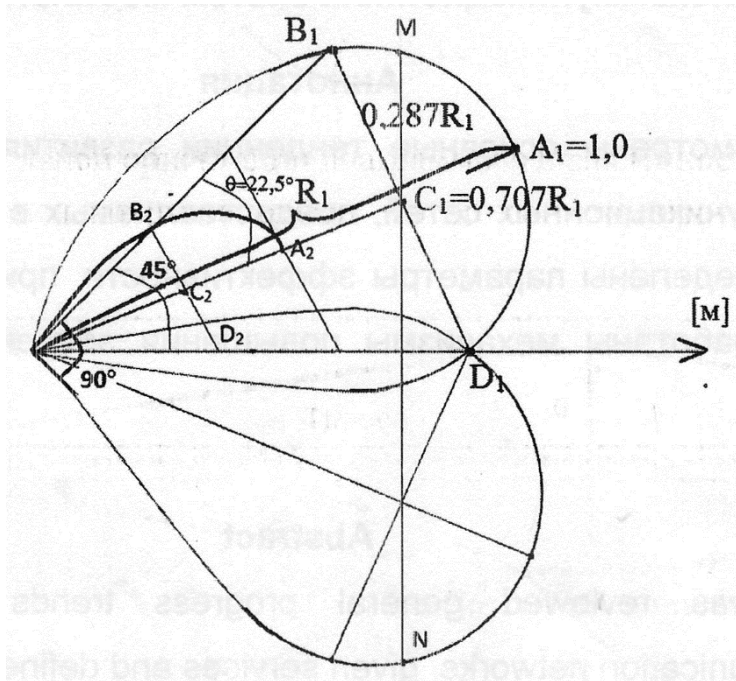


Рис. 3.1. Математичні моделі діаграм спрямованості

### Алгоритм виконання роботи :

1. Побудувати графік залежностей  $R_1(f)$ .
2. Розрахувати MN для кожного  $R_1$ .
3. Визначити величину значень  $R_I$  для всіх  $f$ .

$$R_1 = \sqrt{\frac{\left(\frac{P_{\Sigma_{\text{нас}}}^{\Phi\text{Д}}}{2}\right) \cdot K^{\text{ПР.}\Phi\text{Д}} \cdot K^{A1} \cdot K^{\text{Д}}}{\left(\frac{2 \cdot A \cdot k \cdot T_{\text{ш.вх.}}^{\text{МТ}} \cdot \Delta f_{\text{ш}}}{K^{A2} \cdot K_{\text{д}}}\right)}}} \cdot \frac{\frac{c}{f}}{4 \cdot \pi}$$

#### 4. ПРИКЛАД РОЗВ'ЯЗАННЯ ДЛЯ ВАРІАНТУ №30

Дані за варіантом:

$$\Delta f = 300 \text{ [МГц]}; K^{A1} = K^{A2} = 60 \text{ [раз]}; A = 20 \text{ [раз]};$$

Загальні дані:

- $f = 20, 30, 40 \text{ [ГГц]}$ ;
- $P_{\sum \text{нас}}^{\Phi \text{Д}} = 130 \cdot 10^{-3} \text{ [Вт]}$ ;
- $K^{\text{ПР.}\Phi \text{Д}} = 10^{-1}$ ;
- $K_{0|500 \text{ м}} = 0,83 \text{ [раз]}$  – коефіцієнт передачі радіоканалу довжиною 500м;
- $K^{\text{Д}} = 5 \cdot 10^{-1}$ ;
- $T_{\text{ш.вх.}}^{\sum \text{л.тр.}} = 500 \text{ [раз]}$ ;
- $k = 1.38 \cdot 10^{-38} \text{ [Дж/К]}$  – постійна Больцмана;

Визначити величину значень  $R_1$  для всіх  $f$ .

Розраховувати необхідно за формулою для трьох значень  $f = 20, 30, 40 \text{ ГГц}$ :

$$R_1 = \sqrt{\frac{\left( \frac{P_{\sum \text{нас}}^{\Phi \text{Д}}}{2} \right) \cdot K^{\text{ПР.}\Phi \text{Д}} \cdot K^{A1} \cdot K^{\text{Д}}}{\left( \frac{2 \cdot A \cdot k \cdot T_{\text{ш.вх.}}^{\text{МТ}} \cdot \Delta f_{\text{ш}}}{K^{A2} \cdot K_{\text{д}}} \right)}} \cdot \frac{c}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{f}{f}$$

Для  $f = 20 \text{ ГГц}$ :  $R_1 = 289 \text{ м}$ . Для  $f = 30 \text{ ГГц}$ :  $R_1 = 192 \text{ м}$ . Для  $f = 40 \text{ ГГц}$ :  $R_1 = 144 \text{ м}$ .

Побудувати графік залежностей  $R_1(f)$  (рис. 3.2).

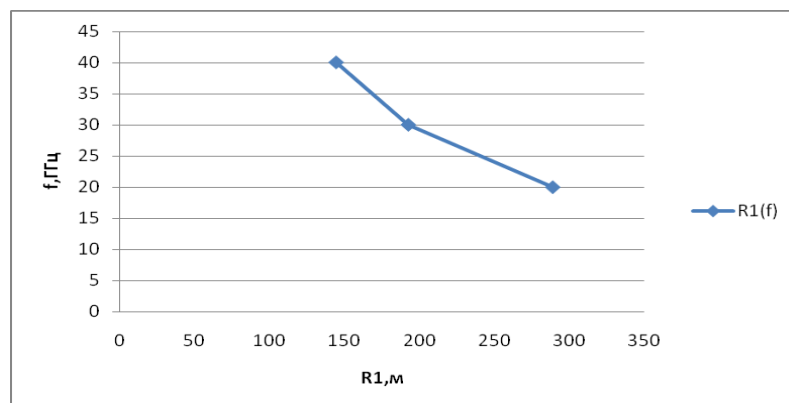


Рис. 3.2. Графік залежностей  $R_1(f)$

Розрахувати MN для кожного  $R_1$ .

Для  $R_1=289$  м,

$$\operatorname{tg}\Theta = 0.414 = B_1C_1/OC_1; B_1D_1 = 2 \cdot 0.287 \cdot R_1 = 165 \text{ м}$$

$$MN \approx 0.9 \cdot 2 \cdot B_1D_1 = 2 \cdot 165 = 330 \text{ м}$$

Для  $R_1=192$  м,

$$\operatorname{tg}\Theta = 0.414 = B_1C_1/OC_1; B_1D_1 = 2 \cdot 0.287 \cdot R_1 = 109 \text{ м}$$

$$MN \approx 0.9 \cdot 2 \cdot B_1D_1 = 2 \cdot 109 = 218 \text{ м.}$$

Для  $R_1=144$  м,

$$\operatorname{tg}\Theta = 0.414 = B_1C_1/OC_1; B_1D_1 = 2 \cdot 0.287 \cdot R_1 = 82 \text{ м}$$

$$MN \approx 0.9 \cdot 2 \cdot B_1D_1 = 2 \cdot 82 = 164 \text{ м.}$$

### КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Назвіть та опишіть математичні моделі діаграм спрямованості.
2. Що таке постійна Больцмана?
3. Назвіть існуючі параметри радіоканалу безпроводового доступу.
4. Фізичний сенс рівняння енергетичного балансу?

### ЛІТЕРАТУРА

1. <http://www.telecoms.com/54943/> China Mobile brings TD-LTE to high-speed trains.
2. Сундучков К.С., Голик А.Л., Волков С.Э., Ящук А.С., Сундучков И.К. «Метод расчета параметров радиоканала беспроводного доступа к мобильным терминалам в миллиметровом диапазоне»// ж. «Известия ВУЗов. Радиоэлектроника», 2014, №4, том 56.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4  
ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СИГНАЛУ OFDM

1. ВСТУПНА ЧАСТИНА

Мета роботи:

- навчитися обчислювати кількість піднесучих, які потрібні для забезпечення заданої швидкості передачі даних;
- навчитися обчислювати практичну ширину смуги частот, яку займає один підканал, і сумарну смугу частот, яку займають усі канали.

3. ВИХІДНІ ДАНІ

Парметри передавача OFDM (табл. 4.1):

- 1) тип маніпуляції;
- 2) тип місцевості;
- 3) швидкість передачі одного біта після пакетування;
- 4) швидкість завадостійкого кодування;
- 5) величина циклічного префікса.

*Таблиця 4.1.*

**Парметри передавача OFDM**

№ варіанта	Тип маніпуляції	Тип місцевості	Швидкість передачі даних після пакетування	Швидкість завадостійкого кодування	Величина циклічного префікса
1	QAM-16	офіс	15 мбіт/с 30 мбіт/с 60 мбіт/с	1/2	1/4
2	QAM -32	міська забудова	30 мбіт/с 60 мбіт/с 90 мбіт/с	1/3	1/8

Продовження Таблиці 4.1.

№ варіанта	Тип маніпуляції	Тип місцевості	Швидкість передачі даних після пакування	Швидкість завадо- стійкого кодування	Величина циклічного префікса
3	QAM -64	сільська місцевість	40 мбіт/с 60 мбіт/с 80 мбіт/с	2/3	1/16
4	BPSK	офіс	25 мбіт/с 50 мбіт/с 75 мбіт/с	3/4	1/32
5	QPSK	міська забудова	15 мбіт/с 30 мбіт/с 60 мбіт/с	1/2	2/9
6	QAM-8	сільська місцевість	30 мбіт/с 60 мбіт/с 90 мбіт/с	1/3	1/4
7	QAM-16	офіс	40 мбіт/с 60 мбіт/с 80 мбіт/с	2/3	1/8
8	QAM-32	міська забудова	25 мбіт/с 50 мбіт/с 75 мбіт/с	3/4	1/16
9	QAM-64	сільська місцевість	15 мбіт/с 30 мбіт/с 60 мбіт/с	1/2	1/32
10	BPSK	офіс	30 мбіт/с 60 мбіт/с 90 мбіт/с	1/3	2/9

Продовження Таблиці 4.1.

№	Тип маніпуляції	Тип місцевості	Швидкість передачі даних після пакування	Швидкість завадо- стійкого кодування	Величина циклічного префікса
11	QPSK	міська забудова	40 мбіт/с 60 мбіт/с 80 мбіт/с	2/3	1/4
12	QAM -8	сільська місцевість	25 мбіт/с 50 мбіт/с 75 мбіт/с	3/4	1/8
13	QAM -16	офіс	15 мбіт/с 30 мбіт/с 60 мбіт/с	1/2	1/16
14	QAM -32	міська забудова	30 мбіт/с 60 мбіт/с 90 мбіт/с	1/3	1/32
15	QAM -64	сільська	40 мбіт/с 60 мбіт/с 80 мбіт/с	2/3	2/9
16	BPSK	місцевість	25 мбіт/с 50 мбіт/с 75 мбіт/с	3/4	1/4
17	QPSK	міська забудова	15 мбіт/с 30 мбіт/с	1/2	1/8
18	QAM-8	сільська місцевість	30 мбіт/с 60 мбіт/с 90 мбіт/с	1/3	1/16

Продовження Таблиці 4.1.

№ варіанта	Тип маніпуляції	Тип місцевості	Швидкість передачі даних після пакетування	Швидкість завадо- стійкого кодування	Величина циклічного префікса
19	QAM -16	офіс	40 мбіт/с 60 мбіт/с 80 мбіт/с	2/3	1/32
20	QAM -32	міська забудова	25 мбіт/с 50 мбіт/с	3/4	2/9
21	QAM -128	міська забудова	15 мбіт/с 30 мбіт/с 60 мбіт/с	1/2	1/4
22	QAM -32	сільська місцевість	30 мбіт/с 60 мбіт/с 90 мбіт/с	1/3	1/8
23	BPSK	офіс	40 мбіт/с 60 мбіт/с 80 мбіт/с	2/3	1/16
24	QPSK	міська забудова	25 мбіт/с 50 мбіт/с 75 мбіт/с	3/4	1/32
25	QAM -64	сільська місцевість	15 мбіт/с 30 мбіт/с 60 мбіт/с	1/2	2/9
26	QAM -16	офіс	30 мбіт/с 60 мбіт/с 90 мбіт/с	1/3	1/4



Продовження Таблиці 4.1.

№ варіанта	Тип маніпуляції	Тип місцевості	Швидкість передачі даних після пакування	Швидкість завадо- стійкого кодування	Величина циклічного префікса
27	QAM -128	міська забудова	40 мбіт/с 60 мбіт/с 80 мбіт/с	2/3	1/8
28	QAM -32	офіс	25 мбіт/с 50 мбіт/с 75 мбіт/с	3/4	1/16
29	BPSK	міська забудова	15 мбіт/с 30 мбіт/с 60 мбіт/с	1/2	1/32
30	QAM	сільська місцевість	15 мбіт/с 30 мбіт/с 60 мбіт/с	1/3	2/9
31	QAM -64	офіс	30 мбіт/с 60 мбіт/с 90 мбіт/с	2/3	1/4
32	QAM -16	міська забудова	40 мбіт/с 60 мбіт/с 80 мбіт/с	3/4	1/8
33	QAM -128	офіс	25 мбіт/с 50 мбіт/с 75 мбіт/с	1/2	1/16
33	QAM -128	офіс	25 мбіт/с 50 мбіт/с 75 мбіт/с	1/2	1/16

Продовження Таблиці 4.1.

№ варіанта	Тип маніпуляції	Тип місцевості	Швидкість передачі даних після пакетування	Швидкість завадо- стійкого кодування	Величина циклічного префікса
34	QAM -32	міська забудова	15 мбіт/с 30 мбіт/с 60 мбіт/с	1/3	1/32
35	BPSK	сільська местность	30 мбіт/с 60 мбіт/с 90 мбіт/с	2/3	2/9
36	QPSK	офіс	40 мбіт/с 60 мбіт/с 80 мбіт/с	3/4	1/4
37	QAM -64	міська забудова	25 мбіт/с 50 мбіт/с 75 мбіт/с	1/2	1/8
38	QAM -16	сільська місцевість	15 мбіт/с 30 мбіт/с 60 мбіт/с	1/3	1/16
39	QAM -32	сільська місцевість	30 мбіт/с 60 мбіт/с 90 мбіт/с	2/3	1/32
40	BPSK	міська забудова	40 мбіт/с 60 мбіт/с 80 мбіт/с	3/4	1/16

## 2. ЗАВДАННЯ НА ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

Мета роботи:

Визначити за наведеними параметрами кількість піднесучих, які потрібні для забезпечення заданої швидкості передачі даних, а також визначити практичну ширину смуги частот, яку займає один підканал і сумарну смугу частот, яку займають усі канали.

Алгоритм визначення параметрів OFDM.

Перш за все потрібно визначити тривалість імпульсу, для цього скористаємося заданою довжиною захисного інтервалу і циклічним префіксом.

З огляду на тип забудови, виберемо  $\tau_3$ .

Для умов офісу в локальних безпроводових мережах типовий час затримки складає 20-200 нс, в системах BWA в умовах міської забудови – 5-10 мікросекунд, 0.2 мс в сільській місцевості. Циклічний префікс вибирається в межах від 1/32 до 1/4.

Візьмемо з умови варіанту  $\tau_3$ ,  $C_p$ , FEC

Тоді

$$\tau_{ikm} = \frac{\tau_3}{C_p} \text{ мкс.}$$

На виході модулятора сумарна швидкість передачі буде дорівнювати:

$$V_{\Sigma} = w V_k \frac{wk}{\tau_{ikm}},$$

де  $k = \log_2(M)$  – степінь маніпуляції;  $\tau_{ikm}$  – тривалість імпульсу в одному каналі на виході модулятора.

Звідси випливає, що сумарна кількість піднесучих дорівнюватиме:

$$w = \frac{V_{\Sigma} \tau_{ikm}}{k}.$$

Далі знайдемо величину смуги частот одного підканалу:

$$\Delta F_k = \frac{1}{\tau_{ikm}}.$$

При відомій сумарній кількості піднесучих можна знайти величину смуги частот одного підканалу, яка дорівнює:

$$\Delta F_k = \frac{w}{\tau_{ikm}}$$

### 3. ПРИКЛАД РОЗВ'ЯЗАННЯ ДЛЯ ВАРІАНТУ №40

Вихідні дані:

№ варіанта	Тип маніпуляції	Тип місцевості	Швидкість передачі даних після пакування	Швидкість завадо- стійкого кодування	Величина циклічного префікса
40	BPSK	міська забудова	40 мбіт/с 60 мбіт/с 80 мбіт/с	3/4	1/16

Тривалість імпульсу знайдемо з заданої довжини захисного інтервалу і циклічного префіксу.

Для умов офісу в локальних безпроводових мережах типовий час затримки становить 20-200 нс, в системах BWA в умовах міської забудови – 5-10 мкс, 0.2 мс в сільській місцевості. Циклічний префікс вибирається в межах від 1/32 до 1/4.

Візьмемо з умови варіанту  $\tau_3 = 8$  мкс,  $C_p = 1/16$ , FEC=3/4

Тоді 
$$\tau_{ikm} = \frac{\tau_3}{C_p} = 8 \cdot 16 \cdot \frac{3}{4} = 96 \text{ мкс}.$$

Сумарна кількість піднесучих дорівнюватиме:

$$w = \frac{V_{\Sigma} \tau_{ikm}}{k} = \frac{15 \cdot 10^6 \cdot 96 \cdot 10^{-6}}{\log_2 64} = \frac{15 \cdot 96}{6} = 240$$

Визначимо ширину смуги частот, яку займає один підканал:

$$\Delta F_{1k} = \frac{1}{\tau_{ikm}} = \frac{1}{96 \cdot 10^{-6}} = 10,42 \text{ кГц.}$$

Визначимо сумарну смугу частот, що займає сигнал:

$$\Delta F_k = \frac{w}{\tau_{ikm}} = \frac{240}{96 \cdot 10^{-6}} = 2,5 \text{ МГц}$$

### КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Особливість і переваги методу OFDM модуляції.
2. Області використання OFDM модуляції.
3. Що забезпечує ортогональність піднесучих, умова ортогональності.
4. Що таке захисний інтервал в OFDM модуляції і як реалізується?
5. Структура модему OFDM, які відбуваються в ньому процеси?
6. Схема формування сигналу OFDM.
7. Визначення групової швидкості передачі інформації при OFDM.
8. Математична модель використання перетворення Фур'є в системах з OFDM модуляцією.
9. Приймач OFDM сигналу. Схема приймача.
10. Аналого-цифрове перетворення. Пряме перетворення Фур'є.
11. Модуляція. Демодуляція.

### ЛІТЕРАТУРА

- 1) В.Г. Васильєв “Технология фиксированного широкополосного беспроводного доступа WIMAX стандарта IEEE 802.16-2004”
- 2) Дж. Прокис “Цифровая связь”, Москва, Радио и Связь, 2000

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5

# ДОСЛІДЖЕННЯ НЕОБХІДНОЇ ТРИВАЛОСТІ ЧАСОВОГО ЗАХИСНОГО ІНТЕРВАЛУ В OFDM-СИМВОЛІ ПРИ БАГАТОПРОМЕНЕВОСТІ ДЛЯ БОРОТЬБИ З МІЖСИМВОЛЬНИМИ СПОТВОРЕННЯМИ

## 1. ВСТУПНА ЧАСТИНА

Мета роботи:

- Ознайомитися з математичною моделлю розрахунку часової затримки сигналу при багатопроменевому прийомі.
- Визначити межі зміни величини затримки відбитих від перешкод променів у часі.

## 2. ЗАВДАННЯ НА ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

Розрахувати часові затримки від нерухомих перешкод, віддалених одина від одної на 500 м.

## 3. ВИХІДНІ ДАНІ

Вихідні дані для всіх варіантів:

Висота базової станції – 50м;

Перешкоди розташовані на відстані 500 м;

МТ знаходиться на відстані 150 м від БС;

Додаткові вихідні данні для кожного варіанту вибирати за таблицею 5.1.

Алгоритм виконання роботи:

Обчислити довжину прямого променя від БС (базової станції) до МТ (мобільного терміналу):

$$l_{\text{прям}} = \sqrt{H^2 + S^2},$$

де  $l_{\text{прям}}$  – довжина прямого променя,  $H$  – висота розташування БС,  $S$  – відстань від БС до МТ.

Таблиця 5.1.

**Варіанти параметрів для розрахунку**

Параметри	L=1.5км				L=2км			
$l_n$ (с)	2	4	6	3	2	4	6	3
$V[\text{км/год}]$								
250	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
300	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>
100	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>
150	<b>25</b>	<b>26</b>	<b>27</b>	<b>28</b>	<b>29</b>	<b>30</b>	<b>31</b>	<b>32</b>
200	<b>33</b>	<b>34</b>	<b>35</b>	<b>36</b>	<b>37</b>	<b>38</b>	<b>39</b>	<b>40</b>

Розрахувати довжину променя відбитого від нерухомої перешкоди (рис. 5.1):

Сумарна довжина променя відбитого від нерухомої перешкоди складе:

$$l_n = l'_n + l''_n,$$

де  $l'_n$  – довжина прямого променя від БС до перешкоди,  $l''_n$  – довжина відбитого від перешкоди променя.

Розрахувати довжину прямого променя від БС до перешкоди можна за формулою:

$$l'_n = \sqrt{l_a^2 + l_b^2},$$

де  $l_a$  – відстань від БС до перешкоди,  $l_b$  – різниця між висотою розташування БС і висотою точки, в якій промінь відбивається від перешкоди (тут і далі точка відбиття від нерухомої перешкоди дорівнює 20м над трасою.)

Довжина відбитого від перешкоди променя розраховується за формулою:

$$l''_n = \sqrt{l_x^2 + l_y^2},$$

де  $l_x$  – відстань від перешкоди до БС,  $l_y$  – висота розташування точки перевідбиття від нерухомої перешкоди.

Необхідно розрахувати довжину променя відбитого від рухомого перешкоди (рис. 5.1):

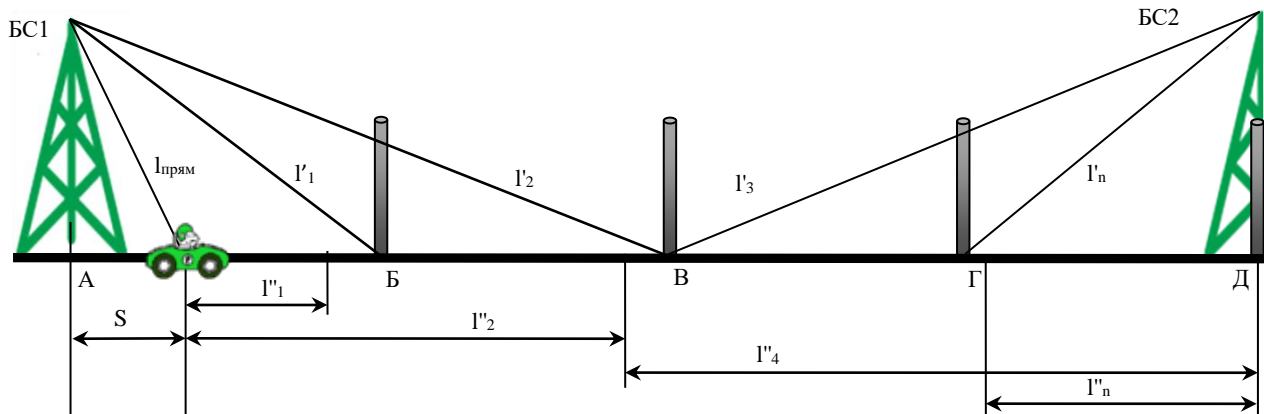


Рис. 5.1. Фрагмент траси з нерухомими перешкодами (стовпами)

Для розрахунку довжини променя відбитого від рухомого об'єкта необхідно (рис. 5.2) обчислити відстань від БС до рухомого об'єкта, а також відстань від рухомого об'єкта до МТ, за формулою:

$$l_{na} = l'_{na} + l''_{na}$$

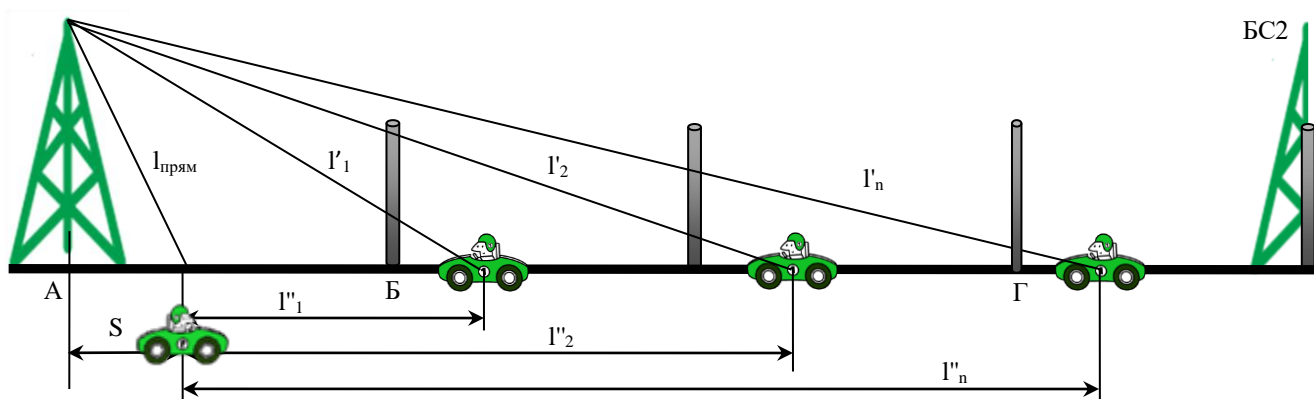


Рис. 5.2. Фрагмент траси з мобільними перешкодами

Відстань від БС до автомобіля на зустрічній смузі розраховується за формулою:

$$l'_{na} = \sqrt{l_{na}^2 + H^2},$$



де  $l_{na}^2$  – відстань від БС до зустрічного автомобіля,  $H$  – висота розміщення БС.

Частина променя відбитого від МТ розраховується за формулою:

$$l_{na}'' = \sqrt{l_{na}^2 + h},$$

де  $l_{na}^2$  – відстань від БС до зустрічного автомобіля,  $h$  – відстань між автомобілем на зустрічній і МТ.

Визначити затримку за часом для кожного відбитого променя:

$$\Delta = \frac{\Delta l_n}{c},$$

де  $\Delta l_n$  – різниця довжини прямого і перевідбитого променя для кожної перешкоди:

$$\Delta l = l_n(l_{na}) - l_{\text{прям}}, \quad c = 299792458 \text{ (м/с)} - \text{швидкість світла в атмосфері.}$$

#### 4. ПРИКЛАД РОЗВ'ЯЗАННЯ ДЛЯ ВАРІАНТУ № 40

Вихідні дані:

$$l_n = 3 \text{ с}; V = 200 \text{ км/ч}; L = 2 \text{ км.}$$

Розрахункова частина.

Спочатку розглянемо промені відбиті від нерухомих перешкод (рис.5.1)

Прямий промінь від БС1:

$$l_{\text{прям}} = \sqrt{H^2 + S^2} = \sqrt{50^2 + 150^2} = 158,1139.$$

Довжина перевідбитого променя:

$$l_1 = l_1' + l_1'' = \sqrt{30^2 + 500^2} + \sqrt{20^2 + 350^2} = 851,6832 \text{ (м)}$$

$$l_2 = l_2' + l_2'' = \sqrt{30^2 + 1000^2} + \sqrt{20^2 + 850^2} = 1850,7292 \text{ (м)}$$

$$l_3 = l_3' + l_3'' = \sqrt{30^2 + 1500^2} + \sqrt{20^2 + 1350^2} = 2850,466 \text{ (м)}$$

$$l_4 = l_4' + l_4'' = \sqrt{30^2 + 2000^2} + \sqrt{20^2 + 1850^2} = 3850,3281 \text{ (м)}$$

Розглянемо довжини перевідбитих променів від рухомих об'єктів на зустрічній смузі автомобілів:

$$l_{1a} = l'_{1a} + l''_{1a} = \sqrt{50^2 + 350^2} + \sqrt{10^2 + 200^2} = 552,5281$$

$$l_{2a} = l'_{2a} + l''_{2a} = \sqrt{50^2 + 850^2} + \sqrt{10^2 + 700^2} = 1552,0121$$

$$l_{3a} = l'_{3a} + l''_{3a} = \sqrt{50^2 + 1350^2} + \sqrt{10^2 + 1200^2} = 2550,634$$

$$l_{4a} = l'_{4a} + l''_{4a} = \sqrt{50^2 + 1850^2} + \sqrt{10^2 + 1700^2} = 3550,6955.$$

Підставимо значення:

$$\Delta l_1 = l_1 - l_{\text{прям}} = 851,6832 - 158,1139 = 693,5693(\text{м})$$

$$\Delta l_2 = l_2 - l_{\text{прям}} = 1850,7292 - 158,1139 = 1692,6153(\text{м})$$

$$\Delta l_3 = l_3 - l_{\text{прям}} = 2850,466 - 158,1139 = 2692,3521(\text{м})$$

$$\Delta l_4 = l_4 - l_{\text{прям}} = 3850,3281 - 158,1139 = 3692,2142(\text{м})$$

$$\Delta l_{1a} = l_{1a} - l_{\text{прям}} = 552,5282 - 158,1139 = 394,4142(\text{м})$$

$$\Delta l_{2a} = l_{2a} - l_{\text{прям}} = 1552,0121 - 158,1139 = 1392,8982(\text{м})$$

$$\Delta l_{3a} = l_{3a} - l_{\text{прям}} = 2550,632 - 158,1139 = 2392,5201(\text{м})$$

$$\Delta l_{4a} = l_{4a} - l_{\text{прям}} = 3550,6955 - 158,1139 = 3392,5816(\text{м})$$

Затримку можна визначити за формулою:

$$\Delta = \frac{\Delta l_n}{c},$$

Таблиця 5.2.

#### Величини затримок від нерухомих перешкод віддалених на 500м

Відстань від МТ до БС1 $S_{(n)}$ [м] $n = 1 \div 11$	$\Delta\tau_1(1)$	$\Delta\tau_2(2)$	$\Delta\tau_3(1,2)$	$\Delta\tau_4(2)$	$\Delta\tau_5(2)$
$S_{(1)}=0$	<b><math>3.17 \cdot 10^{-6}</math></b>				
$S_{(2)}=10$	$3.13 \cdot 10^{-6}$				
$S_{(3)}=450$	$6.66 \cdot 10^{-7}$				

Продовження Таблиці 5.2

Відстань від МТ до БС1 $S_{(n)}$ [м] $n = 1 \div 11$	$\Delta\tau_1(1)$	$\Delta\tau_2(2)$	$\Delta\tau_3(1,2)$	$\Delta\tau_4(2)$	$\Delta\tau_5(2)$
$S_{(4)}=500$	$3.31 \cdot 10^{-8}$	<b><math>3.33 \cdot 10^{-6}</math></b>	<b><math>3.32 \cdot 10^{-6}</math></b>		
$S_{(5)}=510$	немає <i><math>l_{omp(BC1)}</math></i>	$3.26 \cdot 10^{-6}$	$3.26 \cdot 10^{-6}$		
$S_{(6)}=900$		$6.68 \cdot 10^{-7}$	$6.66 \cdot 10^{-7}$	$3.33 \cdot 10^{-8}$	
$S_{(7)}=1010$		немає <i><math>l_{omp(BC1)}</math></i>	$6.66 \cdot 10^{-8}$	$8.03 \cdot 10^{-8}$	
$S_{(8)}=1490$			$3.26 \cdot 10^{-6}$	$3.26 \cdot 10^{-6}$	
$S_{(9)}=1500$			<b><math>3.32 \cdot 10^{-6}</math></b>	<b><math>3.34 \cdot 10^{-6}</math></b>	$3.31 \cdot 10^{-8}$
$S_{(10)}=1510$				немає <i><math>l_{omp(BC2)}</math></i>	$8.00 \cdot 10^{-8}$
$S_{(11)}=2000$					<b><math>3.17 \cdot 10^{-6}</math></b>

З розрахованих результатів видно, що максимальну величину затримка набуває періодично: в безпосередній близькості від базових станцій ( $3.17 \cdot 10^{-6}$  сек), а також поблизу перешкод ( $\sim 3.33 \cdot 10^{-6}$ ).

Таблиця 5.3.

#### Величини затримок від рухомих перешкод віддалених на 500м

Відстань від МТ до БС1 $S_{(n)}$ [м] $n = 1 \div 11$	від 0 до 500	від 500 до 1000	від 1000 до 1500	від 1500 до 2000
$S_{(1)}=0$	<b><math>3.17 \cdot 10^{-6}</math></b>			
$S_{(2)}=10$	$3.07 \cdot 10^{-6}$			
$S_{(3)}=450$	$6.22 \cdot 10^{-8}$	$6.67 \cdot 10^{-7}$		
$S_{(4)}=500$	$3.35 \cdot 10^{-8}$	<b><math>3.33 \cdot 10^{-6}</math></b>		
$S_{(5)}=510$	$8.22 \cdot 10^{-9}$	$3.19 \cdot 10^{-6}$		
$S_{(6)}=900$		$2.96 \cdot 10^{-9}$	<b><math>1.33 \cdot 10^{-6}</math></b>	

Продовження Таблиця 5.3.

Відстань від МТ до БС1 $S_{(n)}$ [м] $n= 1\div 11$	від 0 до 500	від 500 до 1000	від 1000 до 1500	від 1500 до 2000
$S_{(7)}=1010$		$7,96*10^{-9}$		
$S_{(8)}=1490$		<b><math>3,19*10^{-6}</math></b>	$1,26*10^{-6}$	$1,98*10^{-7}$
$S_{(9)}=1500$			$3,33*10^{-6}$	$1,62*10^{-7}$
$S_{(10)}=1510$			<b><math>3,46*10^{-6}</math></b>	$1,40*10^{-7}$
$S_{(11)}=2000$			$3,17*10^{-6}$	<b><math>3,17*10^{-6}</math></b>

Розроблена математична модель дозволила визначити максимальну величину затримки від стаціонарних і мобільних перешкод при русі МТ на автобані.

Максимальна розрахункова величина затримки перевідбитого променя щодо прямого для узгодження умов комп'ютерного експерименту приймемо не більше 3,5 мкс.

При виборі параметрів OFDM-символів для мобільного зв'язку на трасі автобану досить забезпечити величину захисного інтервалу до 10 мкс.

### КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Дати визначення: ортогональний поділ каналів.
2. Принцип організації каналу OFDM?
3. Структура ідеалізованого модему OFDM?
4. Паралельно-послідовне і послідовно-паралельне перетворення?
5. Кодування символів в OFDM модемі.
6. Модуляція сигналу в методі OFDM.
7. Поясніть, чому захисний інтервал повинен бути більшим за максимальну затримку сигналу?
8. Як можна розрахувати затримку за часом перевідбитого променя у відношенні до прямого?

9. Коротко опишіть суть проведених досліджень на автобані.
10. Наведіть приклади рішень проблем, що виникають при організації зв'язку з мобільним терміналом.
11. Якими можливостями володіє безпроводовий доступ?
12. Яке основне завдання управління радіоресурсами?
13. Які види модуляції використовуються в мережах WiMAX?
14. Як боротися з багатопроменевістю?
15. Яка основна ідея методу OFDM?

## ЛІТЕРАТУРА

1. Склад Бернард. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение, 2-е издание.: Пер. с англ. — М.: Издательский дом «Вильямс», 2003 - 1104с.:ил.-Парал
2. Ильченко М. Е., Бунин С. Е., Войтер А. П. Сотовые радиосети с коммутацией пакетов. - К.: Наукова думка, 2003.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

# ДОСЛІДЖЕННЯ НЕОБХІДНОЇ КІЛЬКОСТІ ПІДНЕСУЧИХ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ В ПАРАЛЕЛЬНОМУ РЕЖИМІ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАДАНОЇ БІТОВОЇ ШВИДКОСТІ

## 1. ВСТУПНА ЧАСТИНА

Мета роботи:

Ознайомитися з методом розрахунку кількості піднесучих, що працюють в паралельному режимі.

## 2. ЗАВДАННЯ НА ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

Визначити кількість піднесучих при заданій модуляції і захисному інтервалі для забезпечення необхідної бітової швидкості.

Розрахувати смугу робочих частот при заданій кількості послуг.

## 3. ВИХІДНІ ДАНІ

Таблиця 6.1.

**Таблиця варіантів лабораторної роботи**

Модуляція $t_3$ (мкс)	КАМ-32			КАМ-64			КАМ-128		
4	1	2	3	4	5	6	7	8	9
5	10	11	12	13	14	15	16	17	18
6	19	20	21	22	23	24	25	26	27
7	28	29	30	31	32	33	34	35	36

де  $t_3$  – тривалість захисного часового інтервалу, необхідного для боротьби з міжсимвольною інтерференцією, обумовленою багатопроменевістю.

Вихідні дані для всіх варіантів:

$v=6$  Мбіт/с – бітова швидкість передачі.

Для варіантів 1 – 18:  $K=27$  – кількість послуг.

Для варіантів 19 – 36:  $K=17$  – кількість послуг

Алгоритм виконання роботи:

Визначити кількість піднесучих при заданій модуляції і захисному інтервалі для забезпечення необхідної бітової швидкості

Визначити смугу робочих частот для однієї піднесучої. Розрахувати тривалість імпульсу, який забезпечує ортогональність між піднесучими.

Дуже коротка тривалість імпульсу не дозволить організувати в ньому захисний часовий інтервал, необхідний для боротьби з міжсимвольною інтерференцією, обумовленою багатопроменевістю.

Відношення між тривалістю захисного інтервалу і тривалістю імпульсу піднесучої стандарту IEEE 802.16 має становити:  $CP = \tau_3/T_i = (1/4 \dots 1/32)$ .

Тривалість імпульсу можна збільшити в ціле число раз, тоді в силу кратності збережеться умова ортогональності піднесучих.

Розрахувати смугу робочих частот при заданій кількості послуг.

Займаний спектр однієї послуги визначається як добуток обчисленої кількості піднесучих і смуги робочих частот однієї піднесучої.

Смуга робочих частот, яка займається одним OFDM-символом, визначається за формулою:

$$\Delta W_1 = Kn\Delta f ,$$

де  $K$  – кількість послуг, сигнали яких розміщені в одному OFDM-символі;

$n$  – кількість піднесучих виділених для передачі в паралельному режимі сигналів однієї послуги;

$\Delta f$  – смуга робочих частот однієї піднесучої.

#### 4. ПРИКЛАД РОЗВ'ЯЗАННЯ ДЛЯ ВАРІАНТУ №36

Дано:

Модуляція – КАМ-128;  $t_3=7$  мкс;  $v=6$  Мбіт/с,  $K=17$ .

Визначити кількість піднесучих при заданій модуляції і захисному інтервалі для забезпечення необхідної бітової швидкості.

Визначимо смугу робочих частот для однієї піднесучої:

$$\Delta f = (6 \cdot 10^6) / 7 = 0,86 \text{ МГц.}$$

Розрахуємо тривалість імпульсу (який забезпечує ортогональність між піднесучими):

$$T_i = 1/\Delta f = 1/ (0,86 \cdot 10^6) = 1,16 \cdot 10^{-6} \text{ с} = 1,16 \text{ мкс}$$

Дуже коротка тривалість імпульсу, що дорівнює 1,16 мкс, не дозволить організувати в ньому захисний часовий інтервал, необхідний для боротьби з міжсимвольною інтерференцією, обумовленої багатопроменевістю.

Відношення між тривалістю захисного інтервалу і тривалістю імпульсу піднесучої стандарту IEEE 802.16 має становити:  $CP = \tau_3/T_i = (1/4....1/32)$ .

Тривалість імпульсу можна збільшити в ціле число раз, тоді в силу кратності збережеться умова ортогональності піднесучих.

Кратність збільшення тривалості $T_i$	25	26	27	28
$T_i$ [мкс]	29	30,16	31,32	32,48
$\tau_3$ [мкс]	7	7	7	7
$CP = \tau_3/T_i$	0,241	0,232	0,223	0,216

Очевидно, що 25-ти кратне збільшення тривалості імпульсу при фіксованому значенні тривалості захисного інтервалу, що дорівнює 7 мкс, призводить до найбільшого з рекомендованих стандартом IEEE 802.16 значенню  $CP = 1/4$ . Однак при цьому доведеться для збереження бітової швидкості передачі використовувати 25 піднесучих в паралельному режимі.



Розрахувати смугу робочих частот при заданій кількості послуг

$K$  – кількість послуг, сигнали яких розміщених в одному OFDM-символі;

$N$  – кількість піднесучих в одному OFDM-символі;

$\Delta W_1$  (OFDM-символу) – смуга робочих частот займана одним OFDM-символом.

$K = 17$ ;  $n = 25$  – кількість піднесучих виділених для передачі в паралельному режимі сигналів однієї послуги, то він займатиме спектр сигналів однієї послуги, що дорівнює  $25 \cdot 0,86 = 21,5$  МГц, а загальна кількість піднесучих в одному OFDM-символі рівна:

$N = K \cdot n = 17 \cdot 25 = 425$  [шт]. Тоді:  $\Delta W_1 = 425 \cdot 0,86$  [МГц] = 365,5 МГц.

### КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

- 1) Який протокол канального рівня і який вид модуляції на фізичному рівні використовується в WiMAX системах?
- 2) Назвіть переваги дата-центричної моделі організації мережі WiMax.
- 3) Перерахуйте стандарти WiMax.
- 4) Які основні досягнення Mobile WiMAX?
- 5) За рахунок чого можлива ефективна робота каналу зв'язку в умовах відсутності прямої видимості? Що таке групова помилка і як вона усувається?
- 6) Що таке ефект Доплера і яким методом він усувається в мережах WiMAX?
- 7) Для чого потрібен хендовер?

### ЛІТЕРАТУРА

1. Скляр Бернارد. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение, 2-е издание: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003 – 1104 с.
2. Ильченко М.Ю., Бунин С.Е., Войтер А.П. Сотовые радиосети с коммутацией пакетов. - К.: Наукова думка, 2003.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7

# ВИЗНАЧЕННЯ ПОТУЖНОСТІ СИГНАЛУ, ЩО ПРИЙШОВ З КОСМІЧНОГО АПАРАТУ (КА) ВІД ОДНОГО АБОНЕНТА В ПЛОЩИНІ СТИКУВАННЯ АНТЕНИ З ЛІНІЙНИМ ТРАКТОМ ЗЕМНОЇ СТАНЦІЇ (ЗС) СИСТЕМИ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

## 1. ВСТУПНА ЧАСТИНА

Мета роботи:

Визначити потужність сигналу, що надходить з космічного апарату (КА) від одного абонента в площині стикування антени з лінійним трактом земної станції (ЗС) системи супутникового зв'язку (ССЗ).

Навчитися визначати відстань між ЗС і КА за заданими координатами.

Навчитися визначати сумарну величину втрат сигналу на трасі КА-ЗС.

Навчитися визначати величину потужності сигналу.

## 2. ВИХІДНІ ДАНІ

КА розташований на геостаціонарній орбіті, його координати: широта дорівнює нулю, довгота:  $30^0$  східної довготи.

Коефіцієнт використання поверхні антени.

Сигнал випромінюється з КА на частоті 12 ГГц.

ЕІВП сигналу в робочій смузі, яку випромінює за різними напрямками з урахуванням неточності наведення антен, і не узгодженості поляризації антен.

Діаметри дзеркал прийомних антен ЗС рівні:

варіант 1:

0,9 м; 2,4 м; 5м;

варіант 2:

1,2 м; 3,7 м; 7м;

Координати розташування ЗС наведені в табл 7.1.

**Координати розташування ЗС**

№	Місто	Координати	
		Північна широта	Південна довгота
1	Боярка	50,38°	30,43°
2	Бровари	50,50°	30,75°
3	Рівне	50,65°	26,17°
4	Фастів	50,13°	29,98°
5	Ірпінь	50,52°	30,48°
6	Керч	45,37°	36,45°
7	Харків	50,00°	36,25°
8	Київ	50,47°	30,48°
9	Луганськ	48,58°	39,33°
10	Львів	49,83°	24,00°
11	Малин	50,80°	29,13°
12	Ніжин	51,05°	31,90°
13	Нікополь	47,57°	34,42°
14	Одеса	46,50°	30,77°
15	Полтава	49,58°	34,58°
16	Тетієв	49,37°	29,67°
17	Умань	48,75°	30,17°
18	Ялта	44,50°	34,15°
19	Сміла	49,25°	31,90°
20	Донецьк	48,00°	37,83°

Алгоритм виконання роботи:

Потужність прийнятого сигналу на виході антени в площині стикування антени з лінійним трактом земної станції ССЗ для ЗС з різними діаметрами

дзеркала приймальної антени у відносних одиницях [дБ/Вт] та в абсолютних одиницях [Вт].

Довгота підсупутникової точки ШСЗ «INTELSAT - 604» дорівнює 600 В.Д.

Координати м.Києва:

50,450 С.Ш .; 30,60 В.Д.

Відстань між земною станцією і супутником (похила дальність) визначається відомі співвідношенням (рис. 7.1):

$$d = 42643(1 - 0,2957 \cos \varphi \times \cos \Delta \psi)^{1/2}$$

де  $\varphi$  – географічна широта земної станції;

$\Delta \psi = (g_2 - g_1)$  – різниця за довготою між підсупутникової точкою і точкою розміщення земної станції.

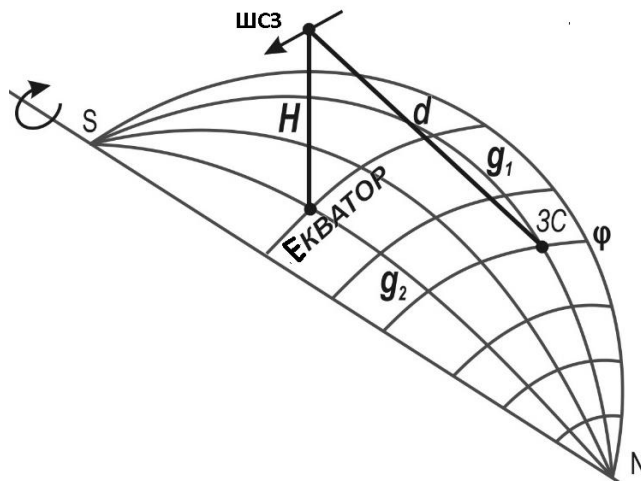


Рис. 7.1. Відстань між земною станцією і супутником

Необхідно перевірити виконання умови прямої видимості:

$$H < d < d_{\max} = 41763 \text{ км.}$$

$C_{\max}$  визначимо, як один з катетів прямокутного трикутника за формулою (рис. 7.2):

$$(H + R)^2 = C_{\max}^2 + R^2.$$

Основними втратами є втрати електромагнітної енергії у вільному просторі на ділянці зв'язку:

$$B_{\text{осн}} = 10 \lg(4\pi d / \lambda)^2$$

де  $d$  – відстань між приймальною і передавальною антенами,  $\lambda$  – довжина хвилі.

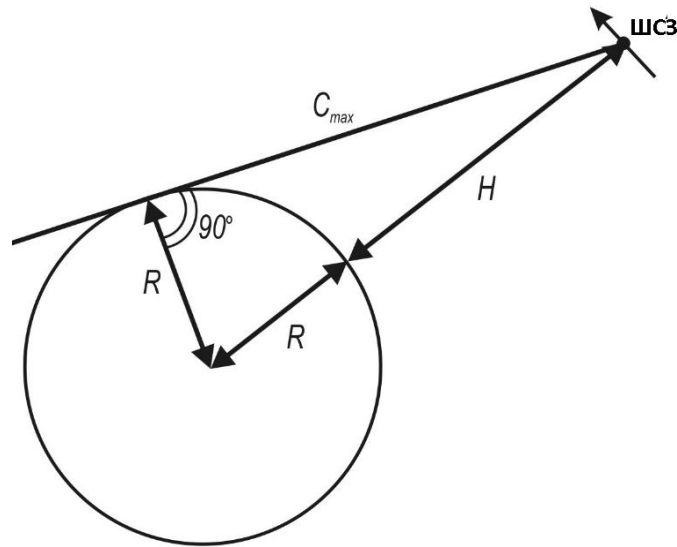


Рис. 7.2. Виконання умови прямої видимості

Розрахунок додаткових втрат здійснюється за формулою:

$$L_{\text{дод}} = L_a + L_d + L_n + L_{\text{п}},$$

де  $L_a$  – втрати через поглинання газами тропосфери;

$L_d$  – втрати через ослаблення в дощі;

$L_n$  – втрати через неточності наведення антен, які визначаються шириною діаграми спрямованості поляризацій антен, приймемо:

$$L_{\text{п}} = 1 \text{ дБ};$$

$L_{\text{п}}$  – втрати через неузгодженість поляризацій антен, приймемо:

$$L_{\text{п}} = 0,5 \text{ дБ}.$$

Для розрахунку величини втрат  $L_a$  необхідно визначити кут місця антени ( $\theta$ ) земної станції.

Величина ослаблення сигналу  $L_a$ , визначається наступними формулами:

$$L_a = (h_{0_2} \gamma_{0_2} + h_{H_2O} \gamma_{H_2O}) / \sin \theta$$

де  $\gamma_{0_2}$  – погонне ослаблення у кисні, дБ/км, визначається за графіком залежно від частоти  $\gamma_{0_2} = 0,007$  дБ/км;

$\gamma_{H_2O}$  – погонне послаблення у водяній парі, дБ/км, визначається за  $p \cdot 10/7,5$ , що враховує вологість водяної пари  $p$ , яке може відрізнятись від значення  $7,5 \text{ г/м}^3$ , зазначеного на графіку.

Величина потужності сигналу в площині стикування антени з лінійним трактом ЗС визначається за формулою:

$$P_{\text{СВХ}}^{\text{ЗС,АА}} = \text{ЕІВП}_c^{K_y^A} / L_\Sigma$$

де  $K_y^A$  – коефіцієнт посилення антени;  $L_\Sigma$  – сумарні втрати сигналу; ЕІВП – еквівалентно ізотропна випромінювана потужність сигналу, що випромінюється одним абонентом.

$$K_y^A = \frac{K_{\text{вик}} \pi^2 D^2}{\lambda^2},$$

де  $D$  – діаметр дзеркала антени;  $\lambda$  – довжина хвилі.

#### ПРИКЛАД РОЗВ'ЯЗАННЯ ДЛЯ ВАРІАНТУ №20

Відстань між КА "Hellas-Sat 2" і ЗС у місті Донецьк знаходимо за формулою:

$$d = 42643(1 - 0,2957 \cos \varphi \cdot \cos \Delta \psi)^{1/2}$$

де  $\varphi = 48,00^\circ$ ,  $\Delta \psi = \psi_1 - \psi_2 = 39^\circ \text{ В.Д.} - 37,83^\circ \text{ В.Д.} = 1,17^\circ$

$$d = 42643(1 - 0,2957 \cos 48,00 \cdot \cos 1,17)^{1/2} = 42643(1 - 0,2957 \cdot 0,669)^{1/2}$$

$$d = 42643(1 - 0,19782)^{1/2} = 42643(0,80218)^{1/2} = 42643 \cdot 0,89564 = 38192,97 \text{ км.}$$

Виконаємо перевірку «видимості» ЗС с КА.

$$C_{\text{max}} = \sqrt{(H + R)^2 - R^2} = \sqrt{(35875 + 6371)^2 - 6371^2} = 41763 \text{ км.}$$

Нерівність  $35875 < 38192,97 < 41763$  показує, що ЗС перебуває в полі «видимості» з КА.

Розрахуємо величину основної компоненти загасання сигналу на трасі КА-Земля за формулою:

$$B_{\text{осн}}^{\downarrow} = 10 \lg \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2; \quad \lambda = \frac{c}{f_c} = \frac{30 \cdot 10^9 [\text{см/с}]}{12 \cdot 10^9 [\text{Гц}]} = 2,5 \text{ см}$$

$$B_{\text{осн}}^{\downarrow} = 10 \lg \left( \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 38192,97 \cdot 10^5}{2,5} \right)^2 = 10 \lg (1,9188148 \cdot 10^{10})^2 =$$

$$= 10 \lg (3,682 \cdot 10^{20}) = 10(0,566 \cdot 20) = 205,66 \text{ дБ}$$

$$B_{\text{осн}}^{\downarrow} = 10 \lg A; A = 3,682 \cdot 10^{20} [\text{раз}].$$

Коефіцієнт передачі сигналу на трасі КА-ЗС дорівнює:

$$K_{\text{тр}}^{\text{КА-ЗС}} = \frac{1}{3,682 \cdot 10^{20}} = 0,2716 \cdot 10^{-20} = 2,716 \cdot 10^{-21}$$

$$K_{\text{тр}}^{\text{КА-ЗС}} = 10 \lg (2,716 \cdot 10^{-21}) = 4,34 - 210 = -205,66 \text{ дБ}.$$

### Втрати $L_a$

Для розрахунку величини втрат  $L_a$  необхідно визначити кут місця антени земної станції за графіком (рис. 7.3)

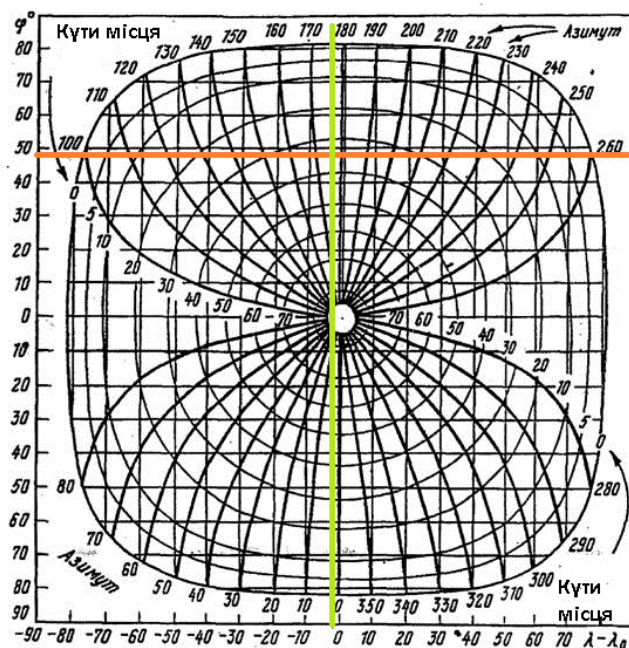


Рис. 7.3. Кут місця антени

при

$$\psi_2 - \psi_1 = 37,83^\circ \text{ В.Д.} - 39^\circ \text{ В.Д.} = -1,17^\circ \text{ В.Д.}$$

$$\varphi = 48,00^\circ \text{ С.Ш.},$$

Таким чином,  $\theta = 35^\circ$

Величина послаблення сигналу  $L_a$  в разях, (рис.7.4.) визначається за наступними формулами:

$$L_a = (h_{O_2} \gamma_{O_2} + h_{H_2O} \gamma_{H_2O}) / \sin \theta$$

де  $\gamma_{O_2}$  – погонне послаблення в кисні, дБ/км, визначається за графіком залежно від частоти;  $\gamma_{O_2} = 0,007$  дБ/км;  $\gamma_{H_2O}$  – погонне послаблення в водяній парі, дБ / км, визначається за  $\rho \cdot 10/7,5$ , що враховує вологовміст водяної пари  $\rho$ , яке може відрізнятися від значення  $7,5 \text{ г/м}^3$ , зазначеного на графіку;  $\gamma_{H_2O} = 0,009 \cdot 10/7,5 = 0,012$  дБ/км;  $h_{O_2}$  – еквівалентна висота кисню, км;  $h_{O_2} = 6$  км при  $f < 50$  ГГц;  $h_{H_2O}$  – еквівалентна висота водяної пари, км.

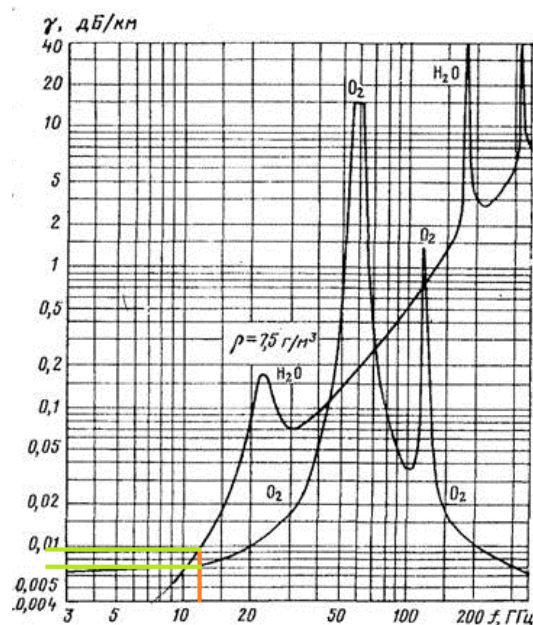


Рис. 7.4. Визначення послаблення сигналу

$$h_{H_2O} = 2,2 + 3 / [3 + (f - 22,3)^2] + 0,3 / [1 + (f - 118,3)^2] + 1 / [1 + (f - 323,8)^2] =$$

$$= 2,2 + 3 / [3 + (12000 - 22,3)^2] + 0,3 / [1 + (12000 - 118,3)^2] + 1 / [1 + (12000 - 323,8)^2] = 2,2 \text{ км}$$

де  $f$  – робоча частота, МГц.

$$L_a = (h_{O_2} \gamma_{O_2} + h_{H_2O} \gamma_{H_2O}) / \sin \theta = (6 \cdot 0,007 + 2,2 \cdot 0,012) / \sin 35^\circ = 0,12 \text{ дБ.}$$

Втрати  $L_d$  (рис. 7.5.)

Висота нульової ізотерми в залежності від широти:



$$h_F = 5,1 - 2,15 \lg(1 + 10)^{(48,00-27)/25} = 3.2 \text{ км.}$$

$$C=1 \text{ при } |\psi| > 40^\circ$$

$$h_d = Ch_F = 3.2 \text{ км.}$$

Довжина шляху сигналу на похилій трасі від станції до висоти дощу:

$$d_d = (h_d - h_0) / \sin \theta \text{ при } \theta > 10^\circ$$

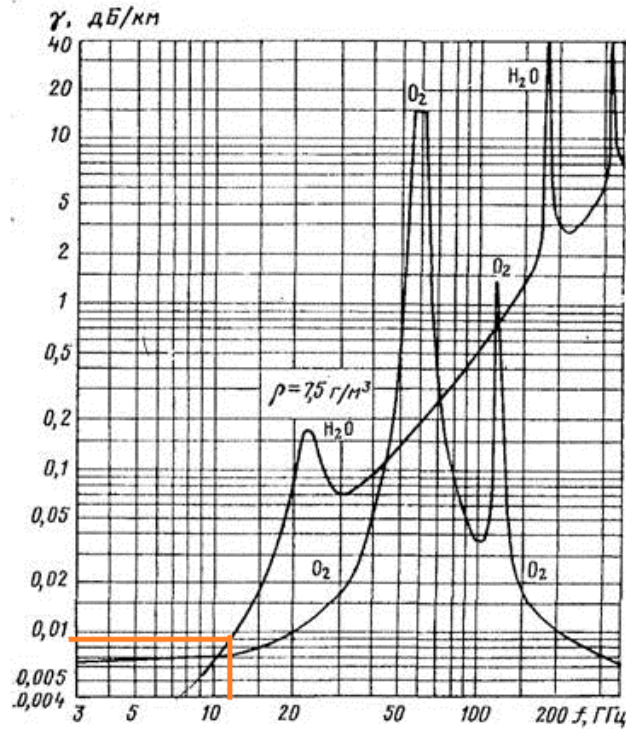


Рис. 7.5. Визначення послаблення сигналу при втратах  $L_d$

$$d_d = (3200 - 450) / \sin 35^\circ = 48 \text{ км.}$$

Горизонтальна проекція похилої траси:

$$d_G = d_d \cos \theta = 4,8 \cdot 0,82 = 3,92 \text{ км.}$$

Фактор зменшення, що враховує нерівномірність дощу для 0,01% часу:

$$r_{0,01} = 90 / (90 + 4d_G) = 90 / (90 + 4 \cdot 3,93) = 0,851 \text{ км.}$$

Для даного регіону  $I_m = 22 \text{ мм/ч}$

$$\gamma_d = 0,009 \text{ дБ/км.}$$

Ослаблення сигналу в дощі перевищується в 0,01% за рік:

$$L_{д0,01} = \gamma_{д} d_{д} r_{0,01} = 0,009 \cdot 4,8 \cdot 0,851 = 0,037 \text{ дБ.}$$

Розрахунок додаткових втрат:

$$L_{\text{дод}} = L_{\text{а}} + L_{\text{д}} + L_{\text{н}} + L_{\text{п}} = 0,12 + 0,037 + 1 + 0,5 = 1,657 \text{ дБ;}$$

$$\text{ЕІВП}_c^{K_y^A} = 41,33 [\text{дБ}] = 13583 [\text{раз}]$$

$$P_{\text{СВХ}}^{3\text{С},\text{АА}} = \text{ЕІВП}_c^{K_y^A} + K_y^A - L_{\Sigma} = 41,33 + K_y^A - 207,257 = -165,927 [\text{дБ}]$$

$$P_{\text{СВХ}}^{3\text{С},\text{АА}} = \frac{\text{ЕІВП}_c^{K_y^A} K_y^A}{L_{\Sigma}} = \frac{13583 K_y^A}{5,3 \cdot 10^{20}} - 2562,8 \cdot 10^{20} K_y^A [\text{раз}]$$

### КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Що ви розумієте під ортогональним поділом каналів?
2. Принцип організації каналу OFDM?
3. Структура ідеалізованого модему OFDM?
4. Паралельно-послідовне і послідовно-паралельне перетворення?
5. Основними втратами називають....?
6. Як перевірити виконання умов, щодо прямої видимості?
7. Як визначається відстань між ЗС і КА?

### ЛІТЕРАТУРА

1. Скляр Бернارد. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение, 2-е издание.: Пер. с англ. — М.: Издательский дом «Вильямс», 2003 - 1104с.:ил.-Парал

2. Ильченко М. Е., Бунин С. Е., Войтер А. П. Сотовые радиосети с коммутацией пакетов. - К.: Наукова думка, 2003.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №8  
ДОСЛІДЖЕННЯ СУМАРНОЇ ЕКВІВАЛЕНТНОЇ ШУМОВОЇ  
ТЕМПЕРАТУРИ НА ВХОДІ ЗС І ДОБРОТНОСТІ ЗС СИСТЕМ  
СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ (ЗС ССЗ) В ПЛОЩИНІ СТИКУВАННЯ АНТЕНИ  
З ЛІНІЙНИМ ТРАКТОМ ЗС ССЗ

1. ВСТУПНА ЧАСТИНА

Мета роботи:

Визначити сумарну еквівалентну шумову температуру на вході земної станції і добротності земної станції систем супутникового зв'язку (ЗС ССЗ) в площині стикування антени з лінійним трактом ЗС ССЗ.

Навчитися визначати коефіцієнт посилення антени, еквівалентну шумову температуру на вході лінійного приймального тракту ЗС ССЗ та на вході Земної станції в площині стикування антени з лінійним трактом ЗС ССЗ.

Навчитися визначати добротність земної станції ССЗ.

2. ВИХІДНІ ДАНІ

Алгоритм виконання роботи:

Структурна схема (кілька варіантів) приймального тракту земної станції в складі: антена, лінійний тракт, приймач; причому лінійний тракт (кілька варіантів) в складі: малошумлячий приймач (МШУ), СВЧ-тракт зниження (фідерний тракт), конвертор, ПЧ-тракт зниження представлені на рис. 8.1.

Значення параметрів елементів структурних схем приймального тракту земної станції ССЗ:

$$f_c = 11 \text{ ГГц}; \quad T_{\text{ш.вх.}}^{\text{МШУ}} = 60 \text{ К}; \quad f_{\text{ПЧ}} = 0,95 \text{ ГГц}; \quad K_y^{\text{конв.}} = 10^5; \quad T_o = 290 \text{ К}; \quad T_{\text{ш.вх.}}^{\text{конв.}} = 75 \text{ К};$$
$$S = 0,2; \quad T_{\text{ш.вх.}}^{\text{пр.}} = 10^4; \quad K_y^{\text{МШУ}} = 100.$$

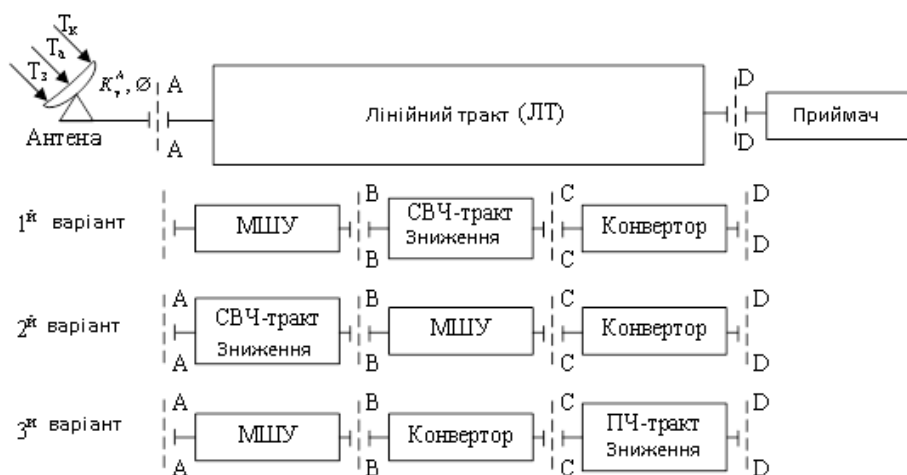


Рис.8.1. Варіанти побудови приймального тракту земної станції системи супутникового зв'язку

Останні значення параметрів наведені в таблиці 8.1. Для трьох варіантів побудови приймального тракту ЗС ССЗ (рис. 8.1) навести розрахункові формули відповідно до наведених пзначень, як для  $T_{ш.ЗС}^{\Sigma AA}$ , так і для виразу добротності ЗС ССЗ.

Таблиця 8.1

### Варіанти наборів параметрів для розрахунку

Параметри	$\eta_{\text{Тр.Сн.}}^{\text{ПЧ}}=0,9$				$\eta_{\text{Тр.Сн.}}^{\text{ПЧ}}=0,95$			
$\eta_{\text{Тр.Сн.}}^{\text{СВЧ}}=0,9$ $\varnothing A, [\text{м}]$	0,8	0,85	0,9	0,95	0,8	0,85	0,9	0,95
0,9	1	2	3	4	5	6	7	8
1,2	9	10	11	12	13	14	15	16
2,4	17	18	19	20	21	22	23	24
3,7	25	26	27	28	29	30	31	32
5,0	33	34	35	36	37	38	39	40
7,0	41	42	43	44	45	46	47	48
12,0	49	50	51	52	53	54	55	56

## 2. ЗАВДАННЯ НА ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

Визначити сумарну еквівалентну шумову температуру  $T_{ш.ЗС}^{\Sigma AA}$  на вході земної станції в площині стикування антени з лінійним трактом земної станції ССЗ і добротність ЗС ССЗ для трьох структурних схем приймального тракту по одному заданому варіанту наборів параметрів для розрахунку ЗС ССЗ представити в дБ.

### 2. ВИХІДНІ ДАНІ

Еквівалентна шумова температура і коефіцієнт посилення антени.

$$T_A = T_K(\gamma) + T_a(\gamma) + sT_z,$$

де складові обумовлені наступними факторами:

$T_K(\gamma)$  – прийомом космічного радіовипромінювання з урахуванням  $\gamma$  кута місця антени земної станції;

$T_a(\gamma)$  – випромінюванням атмосфери з урахуванням дощу і  $\gamma$ ;

$sT_z$  – прийомом випромінювання земної поверхні через бічні пелюстки антени, де  $s = 0,05 \div 0,4$ , а  $T_z = 290K$  для суші.

$$T_a(\gamma) = T'_0 \frac{(L_a \cdot L_d - 1)}{L_a \cdot L_d},$$

де:  $T'_0 = 260K$  – середня термодинамічна температура атмосфери,  $L_a$  и  $L_d$  ослаблення сигналу в атмосфері і в дощі, які можна знайти за графіками.

Еквівалентна шумова температура на вході лінійного приймального тракту ЗС ССЗ.

$$T_{вх}^{III} = T_o (N - 1),$$

$$T_{вх}^{III} = T_o \left( \frac{1}{\eta_{\phi}} - 1 \right),$$

де  $T_o$  – температура навколишнього середовища, зазвичай при нормальній температурі  $T_o = 290K$ .

Сумарна еквівалентна шумова температура на вході земної станції в площині стикування антени з лінійним трактом ЗС ССЗ.



$$T_{Ш.ЗС}^{AA} = \begin{cases} T_{Вх..ЛТ}^{Ш.Σ} \\ + \\ T_{AA}^{Ш.А} \end{cases}$$

$$T_{Вх..ЛТ}^{Ш.Σ} = T_1 + \frac{T_2}{K_1} + \dots + \frac{T_n}{K_{n-1}}.$$

Добротність земної станції ССЗ.

За визначенням добротність дорівнює:

$$Q = \frac{K_y^A}{T_{Ш.ЗС}^{AA}}.$$

#### 4. ПРИКЛАД РОЗВ'ЯЗАННЯ

$$1) \eta_\phi = 0,9, T_o = 290. T_{ВЫХ}^{Ш} = T_o (1 - \eta_\phi) = 290(1 - 0,9) = 29 K.$$

$$T_{ВХ}^{Ш} = T_o \left( \frac{1}{\eta_\phi} - 1 \right) = 290 \left( \frac{1}{0,9} - 1 \right) = 32 K.$$

$$2) \eta_\phi = 0,3, T_o = 290. T_{ВЫХ}^{Ш} = T_o (1 - \eta_\phi) = 290(1 - 0,3) = 203 K.$$

$$T_{ВХ}^{Ш} = T_o \left( \frac{1}{\eta_\phi} - 1 \right) = 290 \left( \frac{1}{0,3} - 1 \right) = 290(3,3 - 1) = 676 K.$$

$$T_{Вх..ЛТ}^{Ш.Σ} = T_o + \frac{T_2}{K_1} + \dots + \frac{T_n}{K_{n-1}} = 290 + 32/100 + 676/10^5 = 290,32675K.$$

$$T_{Ш.ЗС}^{AA} = 290,32675 + 290 * (1/0,9 - 0,9) = 351,55 K; Q = 100 / 351.55 = 0.25$$

## КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ:

1. Переваги систем супутникового зв'язку?
2. Недоліки систем супутникового зв'язку?
3. Які існують служби в ССЗ?
4. Які існують топології в ССЗ?
5. При якій топології спостерігається двухстрибкове з'єднання?

## ЛІТЕРАТУРА

1. Дятлов А.П. Системы спутниковой связи с подвижными объектами: Учебное пособие. 4.1., г. Таганрог, ТРТУ. 95с (УДК 621.396.931).

1. Системы спутниковой связи. А.М.Бонч-Бруевич, В.Л.Быков, Л.Я.Кантор и др.; Под ред. Л.Я.Кантора: Учеб. пособие для вузов. -М.: Радио и связь. – 224 с.: ил.

**ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 9**  
**ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИНИ ЕКВІВАЛЕНТНОЇ ІЗОТРОПНОЇ**  
**ВИПРОМІНЮВАНОЇ ПОТУЖНОСТІ СИГНАЛУ ТРАНСПОНДЕРОМ**  
**КОСМІЧНОГО АПАРАТУ ПРИ ПЕРЕДАЧІ**  
**ОДНІЄЇ ТЕЛЕВІЗІЙНОЇ ПРОГРАМИ**

**1. ВСТУПНА ЧАСТИНА**

Мета роботи:

Навчитися визначати величину еквівалентної ізотропної випромінюваної потужності сигналу транспондером космічного апарату при передачі однієї телевізійної програми.

**2. ВИХІДНІ ДАНІ**

Знайти потрібну смугу робочих частот  $W$  (без урахування запасу на розфільтрування) і  $i$  (з урахуванням запасу на розфільтрування) для передачі однієї телевізійної програми. Значення величин  $K$ ,  $FEC$  дані в таблиці варіантів №1 лабораторної роботи №2.

Таблиця 9.1

**Варіанти №1**

№ п/п	4:4:4		4:2:2		4:0:0	
	MPEG-2	MPEG-4	MPEG-2	MPEG-4	MPEG-2	MPEG-4
1	1	2	3	4	5	6
2	7	8	9	10	11	12
3	13	14	15	16	17	18
4	19	20	21	22	23	24

№ п/п	4:4:4		4:2:2		4:1:1	
	MPEG-2	MPEG-4	MPEG-2	MPEG-4	MPEG-2	MPEG-4
5	25	26	27	28	29	30
6	31	32	33	34	35	36
7	37	38	39	40	41	42
8	43	44	45	-	-	-



### 3. ЗАВДАННЯ НА ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

Визначення необхідної смуги робочих частот для передачі однієї телевізійної програми

Для отримання телевізійних зображень високої якості частота дискретизації сигналу яскравості обрана частота 13,5 МГц, а для частоти дискретизації різних кольорів сигналів залежить від стандарту якості. У відповідності зі стандартом якості та урахуванням того, що кожен відлік передається за допомогою восьми імпульсів, знаходиться бітова швидкість сумарного цифрового потоку, яка ділиться на коефіцієнт стиснення обраного стандарту стиснення MPEG-2 або MPEG-4. Отримана величина  $R$  – бітова швидкість потоку без урахування завадостійкого кодування з надлишковістю FEC.

Тоді, необхідна бітова швидкість дорівнює  $V_c = \frac{R}{FEC}$ . Для знаходження символної швидкості скористаємося виразом:

$$R_s = \frac{V_c}{K}.$$

Займана смуга частот сигналу (без запасу на розфільтровку) дорівнює  $W = |R_s|$  [Гц].

Визначення величини еквівалентної ізотропної випромінюваної потужності сигналу транспондером космічного апарату при передачі однієї телевізійної програми.

Для заданого варіанту в попередніх роботах визначені ЕІВП. Вище визначена необхідна смуга робочих частот  $W$  (без урахування запасу за смугою частот на розфільтрування).

Величину еквівалентно ізотропно-випромінюваної потужності сигналу транспондером КА при передачі однієї телевізійної програми визначимо за формулою:

$$E_{с.вих. ант.}^{КА} = E_{с.вих. ант.}^{СП} \cdot W.$$

#### 4. ПРИКЛАД РОЗВ'ЯЗННЯ ДЛЯ ВАРІАНТУ №40

Для варіанту №40 з таблиці варіантів в лабораторній роботі №2 знаходимо:  $K = 5$ ;  $FEC = 3/4$ . З таблиці варіантів в даній роботі для варіанта №40 маємо: MPEG-4; формат якості 4: 2: 2. З лабораторної роботи №1 для варіанта №40 маємо: м.Київ; супутник «Hellas-Sat», ЕІВП = 48,55 дБВт.

Сумарний цифровий потік при стандарті якості цифрового кодування 4: 2: 2, що отримується шляхом об'єднання потоків сигналу яскравості ( $13,58 \times 8 = 108$  Мбіт/сек) і двох сигналів різного кольору RY і BY ( $6,758 \times 8 \times 2 = 108$  Мбіт / сек), дорівнює 216 Мбіт/сек. Якщо використовується стандарт стиснення MPEG-4, то будемо вважати коефіцієнт стиснення рівним 100.

Тоді:  $R = \frac{216 \text{ Мбіт/сек}}{100} = 2,16 \text{ Мбіт/с}$ . Після завадостійкого кодування ( $FEC=3/4$ ) в каналі буде потрібно бітова швидкість  $V_c = \frac{R}{FEC} = \frac{2,16 \text{ Мбіт/сек} \cdot 4}{3} = 2,88 \text{ Мбіт/сек}$ . Тоді займана смуга частот таким сигналом (без запасу на розфільтрування сигналів) буде дорівнювати:

$$W = 576 \text{ кГц}.$$

Величина еквівалентно ізотропно-випромінюваної потужності сигналу транспондером КА при передачі однієї телевізійної програми дорівнює:

$$E_{\text{с.вих.ант.}}^{\text{КА}} = E_{\text{СП}}^{\text{СП}} \cdot W = 0,973 \cdot 10^{-3} [\text{Вт/Гц}] \cdot 576 \cdot 10^{-3} [\text{Гц}] = 560,5 [\text{Вт}] \rightarrow 27 [\text{дБВт}].$$

#### КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ:

1. З яких складових складається композитний сигнал?
2. Яка потрібна пропускна здатність для передачі композитного сигналу без його стиснення?
3. Чим відрізняється роздільне кодування телевізійного сигналу від спільного?

4. З яких операцій складається комплекс – цифрове кодування телевізійного сигналу?
5. Що таке крок квантування?
6. Що таке рівні і пороги квантування?
7. Які види кодів використовуються в тракті цифрового ТБ?
8. Дайте оцінку необхідної швидкості передачі спільного цифрового потоку без його стиснення при стандартах 4: 2: 2 і 4: 4: 4.
9. У скільки разів реалізують стиснення інформації стандарти MPEG?
10. Як кодуються наступні кадри в MPEG: I-frame, P-frame, B-frame?
11. З чого складається «транспортний» потік (MPEG Transport Stream)?

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Полунин А. Уплотнение видеосигнала. Сети, май 2015 г., с. 34.  
<http://www.networld.ru>.
2. Волкова Ю. Сущность MPEG. Сети, июнь 2017 г., с. 38.  
<http://www.networld.ru>.